

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Électrotechnique

Spécialité : Commandes Électriques

Par :

BENZERDJEB Achraf Abdelhamid

BELKADI Younes

Sujet

**Commande d'une génératrice asynchrone à double alimentation générée
par une turbine éolienne**

Soutenu publiquement, le 21 / 06 /2026 , devant le jury composé de :

Mme BOURI Siheme

MCA

Université de Tlemcen

Président

M. DRIS Younes

MCB

Université de Tlemcen

Examineur

Mme BENHADDA Yamina

MCA

Université de Tlemcen

Encadrant

Dédicaces

« Ils ne savaient pas que c'était impossible, alors ils l'ont fait. »

Dédicace d'ACHRAF ABDELHAMID

À mes chers parents, dont l'amour, les sacrifices et la patience ont été le socle de mon parcours ; leur confiance et leurs prières m'ont donné la force d'avancer, même dans les moments les plus difficiles.

À ma famille, refuge et force, qui m'a appris la valeur de la persévérance et du courage silencieux.

À mes amis, pour leur présence lumineuse, et à tous ceux qui ont éclairé mon chemin.

Achraf

Dédicace de YOUNES BELKADI

À mes très chers parents, en témoignage de ma profonde reconnaissance pour leur amour, leurs sacrifices et leur soutien indéfectible.

À mes frères et sœurs, à toute ma famille et à mes proches, pour leurs encouragements de chaque instant.

À mes amis et camarades de promotion, avec qui j'ai partagé les plus beaux moments de ce parcours.

Younes

Remerciements

Au terme de ce travail, il nous est agréable d'exprimer notre gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce mémoire.

Nous remercions avant tout Dieu le Tout-Puissant de nous avoir donné la santé, la volonté, le courage et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer notre plus profonde gratitude à notre encadrante, madame **BENHADDA Yamina**, pour son accompagnement éclairé, sa disponibilité, sa patience et la confiance qu'elle nous a témoignée tout au long de cette recherche. Ses conseils avisés, sa rigueur scientifique et ses encouragements constants ont été déterminants dans l'aboutissement de ce travail ; qu'elle trouve ici l'expression de notre sincère reconnaissance.

Nos remerciements les plus chaleureux s'adressent également à madame **BOURI SIHEM** et à monsieur **DRIS YOUNES**, pour la richesse de leurs remarques, leur disponibilité et leur bienveillance, qui nous ont été d'une aide précieuse.

Nous adressons notre vive reconnaissance à l'ensemble des enseignants du département de Génie Électrique et Électronique, pour la qualité de la formation qu'ils nous ont offerte durant toutes ces années et pour avoir su nous transmettre la passion du savoir. Nous remercions de même le personnel administratif et technique de l'établissement pour son aide et sa disponibilité.

Nous exprimons aussi notre profonde gratitude aux membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'examiner et d'évaluer ce travail ; leurs remarques contribueront sans nul doute à l'enrichir.

Enfin, nous n'oublions pas nos camarades de promotion et nos amis, avec qui nous avons partagé les joies, les doutes et les efforts de ce parcours universitaire.

Résumé

Ce mémoire présente la modélisation et la commande d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA). La turbine et la MADA sont modélisées dans le repère de Park, une stratégie d'extraction du maximum de puissance (MPPT) est mise en œuvre, et un onduleur NPC à trois niveaux commandé par modulation de largeur d'impulsion à porteuses multiples alimente le rotor de la machine. L'ensemble du système est implémenté et simulé sous MATLAB/Simulink ; les résultats confirment la qualité de la tension générée, un faible taux de distorsion harmonique et un contrôle découplé et performant des puissances active et réactive échangées avec le réseau.

Mots-clés : énergie éolienne, machine asynchrone à double alimentation (MADA), onduleur NPC à trois niveaux, modulation de largeur d'impulsion (MLI), commande vectorielle, MPPT, MATLAB/Simulink.

Abstract

This thesis presents the modeling and control of a variable-speed wind energy conversion chain based on a doubly-fed induction generator (DFIG). The turbine and the DFIG are modeled in the Park reference frame, a Maximum Power Point Tracking (MPPT) strategy is implemented, and a three-level Neutral-Point-Clamped (NPC) inverter controlled by multicarrier pulse-width modulation feeds the machine rotor. The whole system is implemented and simulated under MATLAB/Simulink; the results confirm the quality of the generated voltage, a low total harmonic distortion, and a decoupled and efficient control of the active and reactive powers exchanged with the grid.

Keywords: wind energy, doubly-fed induction generator (DFIG), three-level NPC inverter, pulse-width modulation (PWM), vector control, MPPT, MATLAB/Simulink.

ملخص

تتناول هذه المذكرة نمذجة والتحكم في سلسلة تحويل الطاقة الريحية ذات السرعة المتغيرة المعتمدة على آلة لاتزامنية مزدوجة التغذية (MADA). تُنمذج العنفة الريحية والآلة في معلم بارك، وتُعمد استراتيجية تتبع نقطة الاستطاعة العظمى (MPPT)، ويُستعمل مودج توتر من نوع NPC ثلاثي المستويات متحكم فيه بتعديل عرض النبضة متعدد الحوامل لتغذية دوار الآلة. تُقَدَّت المنظومة بأكملها وحوكيت في بيئة MATLAB/Simulink، وتؤكد النتائج جودة التوتر المولد، وانخفاض معدل التشويه التوافقي، وتحكماً مفصلاً وفعالاً في الاستطاعتين الفعالة والردية المتبادلتين مع الشبكة.

الكلمات المفتاحية : الطاقة الريحية، الآلة اللاتزامنية مزدوجة التغذية (MADA)، مودج NPC ثلاثي المستويات، تعديل عرض النبضة (MLI)، التحكم الشعاعي، MPPT، MATLAB/Simulink.

Sommaire

Dédicaces	1
Remerciements	2
Résumé	3
Abstract	4
Introduction générale	12
1 Généralité sur les systèmes éoliens	14
1.1 Introduction	15
1.2 Historique et développement mondial de l'énergie éolienne	15
1.3 Principes physiques de l'énergie éolienne	16
1.3.1 Puissance contenue dans le vent	16
1.3.2 Limite de Betz et coefficient de puissance	18
1.4 Composants principaux d'une éolienne moderne	20
1.4.1 Rotor et pales	20
1.4.2 Nacelle et multiplicateur	21
1.4.3 Génératrice et électronique de puissance	21
1.4.4 Tour, fondations et systèmes auxiliaires	21
1.5 Typologie des éoliennes et architectures de conversion	22
1.5.1 Classification selon la géométrie du rotor	22
1.5.2 Vitesse fixe et vitesse variable	23
1.5.3 Place de la MADA dans les architectures vitesse variable	24
1.6 Avantages et limites de l'énergie éolienne	25
1.6.1 Avantages	25
1.6.2 Limites et contraintes	25
1.7 Potentiel éolien en Algérie	26

1.8	Conclusion	27
2	Modélisation de la Turbine Éolienne et de la MADA	28
2.1	Introduction	29
2.2	Modélisation de la turbine éolienne	29
2.2.1	Modélisation du vent	29
2.2.2	Modèle aérodynamique	30
2.2.3	Modélisation de la partie mécanique	32
2.3	Commande de l'éolienne	33
2.3.1	Stratégie de maximisation de la puissance (MPPT)	34
2.3.2	Résultats de simulation de la commande de la turbine	36
2.4	Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) . .	37
2.4.1	Description et principe de fonctionnement	37
2.4.2	Avantages de la MADA dans les systèmes éoliens	38
2.4.3	Mise en équation électrique dans le repère triphasé (abc)	38
2.4.4	Transformation de Park (Repère d-q)	39
2.4.5	Modèle mathématique de la MADA dans le repère de Park	40
2.4.6	Modèle d'état de la machine	42
2.5	Modélisation de la chaîne de conversion (Convertisseurs statiques)	43
2.5.1	Structure du convertisseur côté rotor (RSC) et côté réseau (GSC) . .	43
2.5.2	Modélisation du bus continu (filtre capacitif)	44
2.6	Commande de la MADA : stratégie MPPT et boucles de courant	45
2.6.1	Orientation du flux statorique et découplage	45
2.6.2	Génération des références par la stratégie MPPT	46
2.6.3	Boucles de courant et régulateurs PI	46
2.7	Conclusion	48
3	Modélisation et Commande de l'Onduleur NPC à Trois Niveaux dans la Chaîne Éolienne à MADA	50
3.1	Introduction	51
3.2	Généralités sur les convertisseurs statiques de puissance	51
3.2.1	Définition et classification	51
3.2.2	Rôle des onduleurs dans la chaîne de conversion à MADA	52
3.2.3	Structure back-to-back (RSC / GSC)	52

3.3	De l'onduleur deux niveaux à l'onduleur multiniveaux	53
3.3.1	Rappel de l'onduleur deux niveaux	53
3.3.2	Limites et intérêt des topologies multiniveaux	53
3.4	Modélisation de l'onduleur NPC à trois niveaux	54
3.4.1	Structure de l'onduleur NPC à trois niveaux	54
3.4.2	Modélisation d'un bras de l'onduleur	55
3.4.3	Commande des configurations et fonctions de connexion	57
3.4.4	Fonctions de conversion	59
3.4.5	Tensions simples de sortie	60
3.4.6	Calcul des courants d'entrée	60
3.4.7	Matrices de conversion	61
3.5	Commande MLI de l'onduleur NPC à trois niveaux	62
3.5.1	Commande triangulo-sinusoïdale à deux porteuses	62
3.6	Résultats de simulation de l'onduleur NPC trois niveaux	64
3.6.1	Conditions de simulation	64
3.6.2	Signaux de commande MLI	65
3.6.3	Analyse harmonique et taux de distorsion	65
3.7	Conclusion	66
4	Résultats de simulation et Interprétation	67
4.1	Introduction	68
4.2	Comportement Mécanique de la MADA	68
4.2.1	Vitesse de rotation de la MADA (Ω_T)	68
4.2.2	Couple Électromagnétique (C_e)	69
4.3	Analyse des Puissances de la MADA	71
4.3.1	Puissance Active Statorique (P_s)	71
4.3.2	Puissance Réactive Statorique (Q_s)	71
4.4	Analyse des Courants Statoriques et Rotoriques (Découplage)	72
4.4.1	Courants statoriques (I_{ds} et I_{qs})	72
4.4.2	Courants rotoriques (I_{dr} et I_{qr})	73
4.5	Conclusion	74
	Conclusion générale	75
	Bibliographie	76

A Paramètres du système simulé	78
B Transformation de Park	80

Table des figures

1.1	Illustration du mix énergétique mondial avec part croissante des renouvelables [1].	16
1.2	Évolution historique de la puissance éolienne installée dans le monde (courbe cumulative en GW) [2].	17
1.3	Schéma du "tube de courant d'air" traversant le rotor d'une éolienne [1]. . .	18
1.4	Courbes typiques du coefficient de puissance pour différents angles de calage [1].	19
1.5	Pale d'éolienne avec profil aérodynamique [6].	20
1.6	Schéma de la structure globale d'une éolienne : rotor, nacelle, multiplicateur, génératrice, convertisseurs, tour et fondations [6].	22
1.7	Comparaison schématique entre une éolienne à axe horizontal et une éolienne à axe vertical [1].	23
1.8	Schéma de principe d'une chaîne de conversion éolienne à base de MADA [5].	24
1.9	Carte de la vitesse moyenne annuelle du vent en Algérie, avec mise en évidence des zones à fort potentiel [2].	26
2.1	Profil de vitesse du vent simulé. [19]	30
2.2	Courbe du coefficient de puissance C_p . [19]	31
2.3	Modèle mécanique de l'éolienne [19].	32
2.4	Diagramme bloc du modèle de la turbine. [19]	33
2.5	Schéma bloc du modèle de la turbine contrôlé par un régulateur PI. [19] . . .	35
2.6	Schéma bloc de la régulation de la vitesse de rotation. [19]	35
2.7	Vitesse mécanique : référence et valeur réelle. [19]	36
2.8	Puissance aérodynamique. [19]	36
2.9	Coefficient de puissance C_p . [19]	37
2.10	Rapport de vitesse λ . [19]	37
2.11	Structure de la commande vectorielle de la MADA : stratégie MPPT et boucles de courant à régulateurs PI.	47
2.12	Schéma de régulation des puissances P_s et Q_s . [19]	47

3.1	Structure back-to-back de la chaîne de conversion de la MADA, avec les fonctions respectives du RSC et du GSC [5].	53
3.2	Onduleur triphasé à trois niveaux de structure NPC [19].	55
3.3	Structure d'un bras de l'onduleur NPC à trois niveaux [19].	56
3.4	Séquences de fonctionnement d'un bras de l'onduleur NPC à trois niveaux [19].	56
3.5	Génération des signaux de commande MLI d'un bras de l'onduleur NPC trois niveaux. [19]	63
3.6	Principe de la commande triangulo-sinusoïdale à deux porteuses [19].	64
3.7	Modulante sinusoïdale et porteuses triangulaires (zoom sur 1–2 périodes), et impulsions de commande d'un bras.	65
3.8	Spectre harmonique de la tension de sortie et valeur du THD (outil FFT de powergui).	65
4.1	Schéma de simulation global de la chaîne de conversion éolienne sous MATLAB/Simulink.	68
4.2	Vitesse de rotation de la MADA (Ω_T).	69
4.3	Couple électromagnétique (C_e).	70
4.4	Puissance active statorique (P_s).	71
4.5	Puissance réactive statorique (Q_s).	72
4.6	Courants statoriques I_{ds} et I_{qs}	73
4.7	Courants rotoriques I_{dr} et I_{qr}	74

Table des tables

3.1	Commande complémentaire n° 1 : $S_{i1} = \overline{S_{i2}}, S_{i3} = \overline{S_{i4}}$	57
3.2	Commande complémentaire n° 2 : $S_{i1} = \overline{S_{i3}}, S_{i2} = \overline{S_{i4}}$	58
3.3	Commande complémentaire n° 3 : $S_{i1} = \overline{S_{i4}}, S_{i2} = \overline{S_{i3}}$	58
3.4	Paramètres de simulation.	64
A.1	Paramètres électriques et mécaniques de la MADA.	79
A.2	Paramètres de l'onduleur NPC à trois niveaux et de la simulation.	79

Introduction générale

La consommation mondiale d'énergie électrique ne cesse de croître sous l'effet de la croissance démographique, de l'industrialisation et de la généralisation des usages numériques. Cette demande repose encore majoritairement sur les combustibles fossiles, dont les réserves s'épuisent et dont la combustion est responsable d'émissions massives de gaz à effet de serre. Dans ce contexte, le recours aux énergies renouvelables s'impose comme une nécessité à la fois environnementale et stratégique.

Parmi ces énergies, l'énergie éolienne est aujourd'hui l'une des filières les plus matures et les plus compétitives en termes de coût du kilowattheure produit. L'Algérie, longtemps dépendante des hydrocarbures, dispose d'un potentiel éolien appréciable, en particulier dans les régions du Sud, et s'engage progressivement dans la valorisation de cette ressource.

La conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique repose sur la chaîne éolienne, dont la génératrice constitue l'élément central. La machine asynchrone à double alimentation (MADA) s'est imposée dans les éoliennes de moyenne et grande puissance à vitesse variable. Son principal atout réside dans le fait que les convertisseurs statiques placés au rotor ne traitent qu'une fraction (environ 30 %) de la puissance nominale, ce qui réduit leur coût et leurs pertes tout en autorisant un contrôle indépendant des puissances active et réactive échangées avec le réseau.

L'interface d'électronique de puissance joue ainsi un rôle déterminant dans la qualité de l'énergie produite. L'onduleur de tension, et en particulier la topologie NPC (*Neutral Point Clamped*) à trois niveaux, permet de générer une tension de sortie plus proche de la sinusoïde et un faible taux de distorsion harmonique.

L'objectif de ce travail est de modéliser et de simuler une chaîne de conversion éolienne complète à base de MADA, associée à un onduleur NPC à trois niveaux, puis d'analyser ses performances sous l'environnement MATLAB/Simulink. Ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

- le **chapitre 1** présente des généralités sur les systèmes éoliens : principe de conversion, constituants, typologies et potentiel éolien ;
- le **chapitre 2** est consacré à la modélisation de la turbine éolienne et de la MADA dans le repère de Park, ainsi qu'à la stratégie d'extraction du maximum de puissance (MPPT) ;
- le **chapitre 3** traite de la modélisation et de la commande de l'onduleur de tension

NPC à trois niveaux par modulation de largeur d'impulsion ;

- le **chapitre 4** présente et interprète les résultats de simulation de l'ensemble du système.

Chapitre 1

Généralité sur les systèmes éoliens

1.1 Introduction

La croissance continue de la demande mondiale en énergie électrique, portée par l'industrialisation, l'urbanisation et la généralisation des usages numériques, exerce une pression croissante sur les systèmes de production traditionnels. Ces derniers reposent majoritairement sur des ressources fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) dont les réserves sont limitées et dont la combustion engendre des émissions importantes de gaz à effet de serre, responsables du réchauffement climatique [1]. Dans ce contexte, les énergies renouvelables occupent une place stratégique. Elles permettent de diversifier le mix énergétique, de réduire la dépendance vis-à-vis des hydrocarbures et de limiter l'impact environnemental de la production d'électricité. Parmi ces filières, l'énergie éolienne s'est imposée comme l'une des plus matures sur le plan industriel et l'une des plus compétitives en termes de coût du kWh produit [1]. L'Algérie, productrice et exportatrice d'hydrocarbures, s'inscrit progressivement dans cette dynamique. Les études menées par différents organismes nationaux et laboratoires universitaires montrent en effet que le pays dispose d'un potentiel éolien significatif, particulièrement dans les régions sahariennes. L'exploitation rationnelle de ce gisement permettrait de préserver les ressources fossiles, de renforcer la sécurité énergétique et de contribuer aux engagements climatiques du pays [2]. Dans cette optique, la maîtrise de la chaîne de conversion éolienne, depuis la turbine jusqu'à la génératrice et au réseau, représente un enjeu scientifique et technique majeur. La machine asynchrone à double alimentation (MADA), largement utilisée dans les éoliennes à vitesse variable de moyenne et grande puissance, constitue le cœur de cette chaîne de conversion et fera l'objet des études détaillées dans les chapitres suivants [3,4]. La figure 1.1 illustre la part croissante des énergies renouvelables dans le mix énergétique mondial.

1.2 Historique et développement mondial de l'énergie éolienne

L'utilisation du vent à des fins énergétiques est ancienne. Les civilisations méditerranéennes et orientales utilisaient déjà des moulins à vent pour pomper l'eau ou moudre le grain. Ces dispositifs, purement mécaniques, ont perduré pendant plusieurs siècles avant d'être progressivement supplantés par les moteurs thermiques et électriques [1]. La conversion de l'énergie éolienne en électricité débute réellement à la fin du XIXe siècle, avec l'apparition des dynamos et des premiers alternateurs. Certaines installations rurales utilisaient des petites éoliennes pour alimenter des fermes isolées. Cependant, le faible coût des combustibles fossiles et la mise en place de réseaux électriques centralisés ont limité le développement

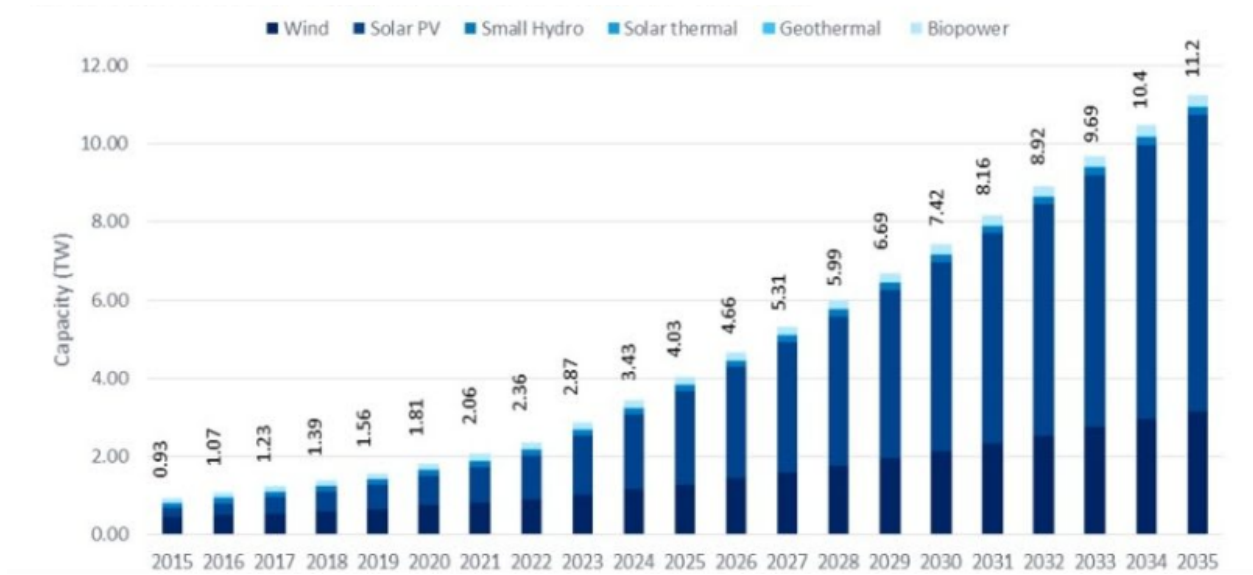


FIGURE 1.1 – Illustration du mix énergétique mondial avec part croissante des renouvelables [1].

de cette filière [1]. Les chocs pétroliers des années 1970 marquent un tournant. La hausse brutale du prix du pétrole, combinée à la prise de conscience des impacts environnementaux, conduit plusieurs pays (États-Unis, Danemark, Allemagne, Espagne...) à investir dans la recherche et le développement des technologies éoliennes modernes [1]. Depuis le début des années 2000, l'énergie éolienne connaît une croissance quasi exponentielle. La puissance mondiale installée a atteint plusieurs centaines de gigawatts, avec une part croissante de parcs offshore en mer du Nord, dans l'Atlantique et en Asie. Les puissances unitaires des éoliennes sont passées de quelques centaines de kilowatts à plusieurs mégawatts, et les technologies de génératrices ont progressivement évolué vers les machines à vitesse variable (MADA et machines synchrones à aimants permanents) [1, 2].

La figure 1.2 présente l'évolution de la puissance éolienne installée dans le monde.

1.3 Principes physiques de l'énergie éolienne

1.3.1 Puissance contenue dans le vent

Le vent est un mouvement de masses d'air dû aux différences de pression et de température dans l'atmosphère. L'énergie associée à ce mouvement est une énergie cinétique. Lorsque ce flux d'air traverse la surface balayée par le rotor d'une éolienne, une partie de cette énergie peut être convertie en énergie mécanique puis en énergie électrique [1].

Considérons un "tube de courant" d'air de surface A (égale à la surface balayée par le rotor) traversé par un vent de vitesse v et de densité ρ . La masse d'air m qui traverse cette

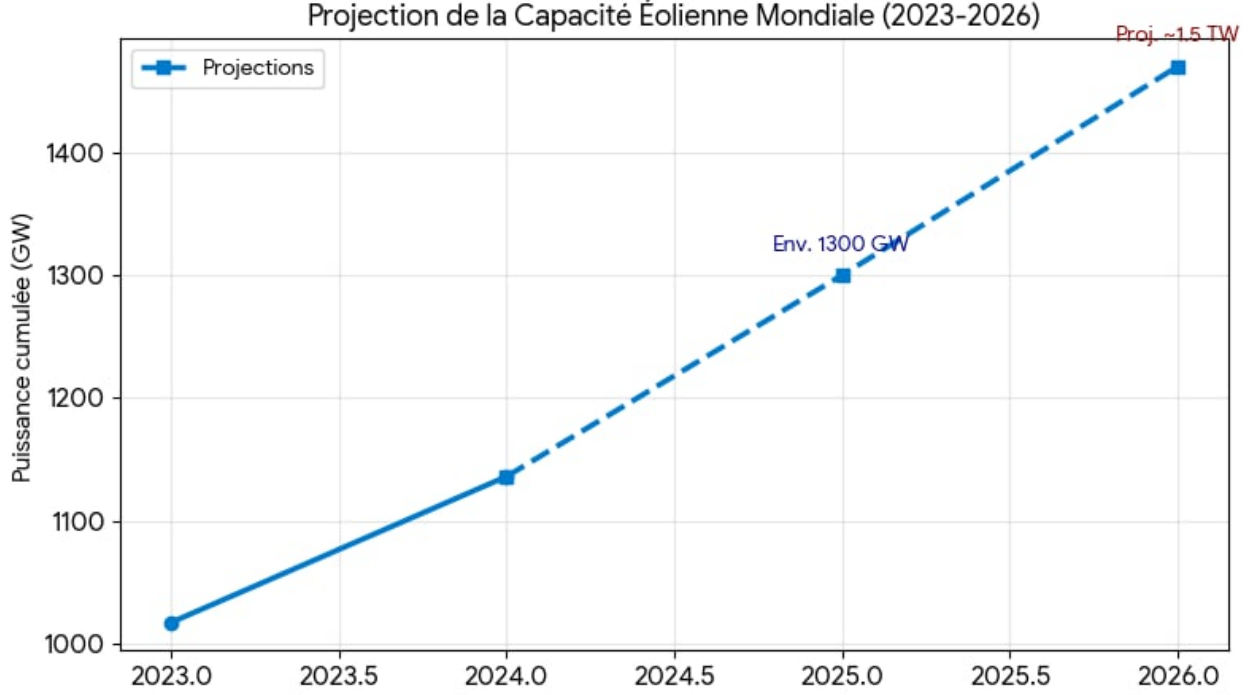


FIGURE 1.2 – Évolution historique de la puissance éolienne installée dans le monde (courbe cumulative en GW) [2].

surface pendant un temps t vaut :

$$m = \rho A v t \quad (1.1)$$

L'énergie cinétique associée à cette masse est :

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3 t \quad (1.2)$$

La puissance disponible dans le vent est alors :

$$P_v = \frac{E_k}{t} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1.3)$$

Cette expression met en évidence plusieurs points essentiels pour le dimensionnement d'une installation éolienne :

- la puissance varie **au cube** de la vitesse du vent : une augmentation modeste de la vitesse moyenne se traduit par un gain très important de puissance potentielle ;
- la puissance est proportionnelle à la surface balayée $A = \pi R^2$: l'augmentation de la longueur des pales permet d'augmenter fortement la puissance nominale de la machine ;
- ρ la densité de l'air, fonction de la température, de la pression et de l'altitude, joue également un rôle, même si son influence reste moins déterminante que celle de la

vitesse du vent [5].

La figure 1.3 schématise le tube de courant d'air traversant le rotor de l'éolienne.

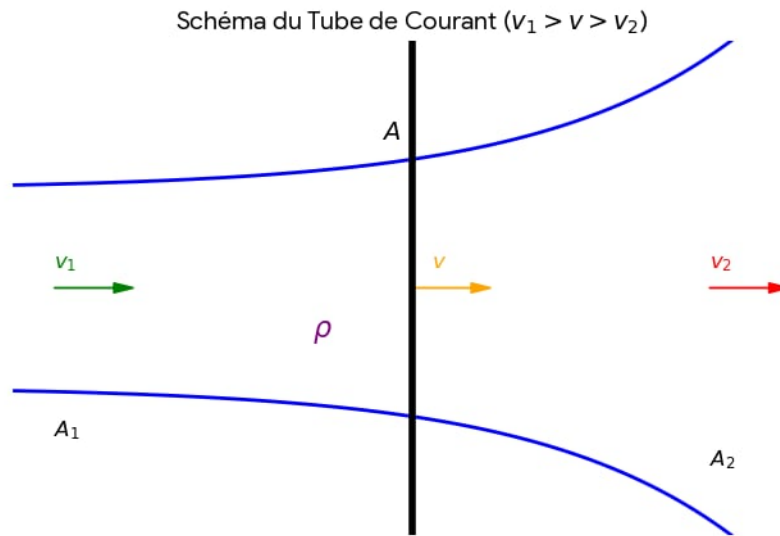


FIGURE 1.3 – Schéma du "tube de courant d'air" traversant le rotor d'une éolienne [1].

1.3.2 Limite de Betz et coefficient de puissance

Une éolienne ne peut pas convertir la totalité de la puissance contenue dans le vent. Pour que l'air puisse continuer à s'écouler à travers le rotor, il est nécessaire qu'une partie de son énergie cinétique soit conservée. En 1919, Betz a montré que, dans des conditions idéales, la fraction maximale de puissance pouvant être extraite est de :

$$C_{p,\max} = \frac{P_{m,\max}}{P_v} = \frac{16}{27} \approx 0,593 \quad (1.4)$$

Ce résultat, connu sous le nom de limite de Betz, signifie qu'aucune turbine ne peut théoriquement convertir plus de 59,3 % de la puissance cinétique du vent [5].

C_p En pratique, le rendement aérodynamique est plus faible en raison des pertes réelles (profil des pales, turbulences, frottements mécaniques...). Les éoliennes industrielles modernes atteignent typiquement des coefficients de puissance maximaux compris entre 0,4 et 0,5 autour de leur point de fonctionnement optimal [5].

C_p En pratique, le rendement aérodynamique est plus faible en raison des pertes réelles (profil des pales, turbulences, frottements mécaniques...). Les éoliennes industrielles modernes atteignent typiquement des coefficients de puissance maximaux compris entre 0,4 et 0,5 autour de leur point de fonctionnement optimal [5].

On définit le coefficient de puissance :

$$C_p = \frac{P_m}{P_v} \quad (1.5)$$

Où P_m est la puissance mécanique disponible sur l'arbre de la turbine. Ce coefficient dépend principalement de deux paramètres :

— le **rapport de vitesse** (ou tip-speed ratio) :

$$\lambda = \frac{R\omega_t}{v} \quad (1.6)$$

Où R est le rayon du rotor et ω_t la vitesse angulaire de la turbine ;

— l'angle de calage des pales β , qui caractérise leur orientation par rapport au flux d'air.

On peut ainsi écrire :

$$C_p = C_p(\lambda, \beta) \quad (1.7)$$

$\lambda_{opt}C_p$ Pour une géométrie donnée de pales, il existe une valeur optimale qui maximise pour un angle de calage donné. Les stratégies de commande de type MPPT (Maximum Power Point Tracking) visent précisément à maintenir le fonctionnement de la turbine au voisinage de ce point optimal en ajustant la vitesse de rotation en fonction de la vitesse du vent [5].

La figure 1.4 montre les courbes typiques du coefficient de puissance pour différents angles de calage.

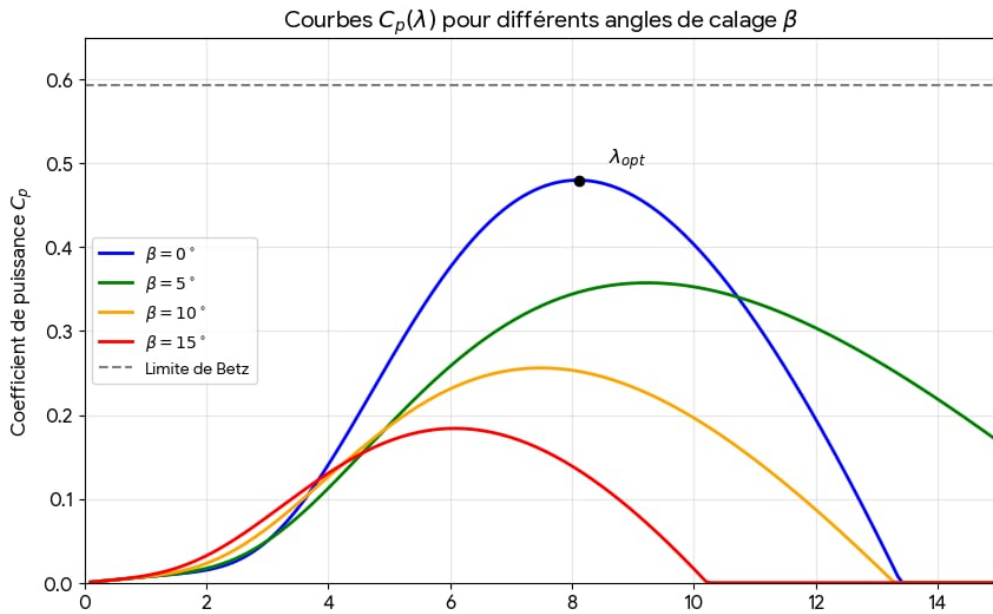


FIGURE 1.4 – Courbes typiques du coefficient de puissance pour différents angles de calage [1].

1.4 Composants principaux d'une éolienne moderne

Une éolienne industrielle moderne, de type horizontal tripale, peut être décomposée en plusieurs sous-systèmes fonctionnels.

1.4.1 Rotor et pales

Le rotor est constitué de deux ou trois pales fixées sur un moyeu. Les grandes éoliennes contemporaines utilisent presque systématiquement trois pales, ce qui permet un bon compromis entre rendement aérodynamique, stabilité mécanique et niveau de bruit. Les pales sont des profils aérodynamiques comparables à des ailes d'avion, souvent réalisés en matériaux composites (fibres de verre ou de carbone et résine) [6]. Le rayon du rotor peut dépasser 60 à 80 m pour des puissances supérieures à 5 MW, ce qui conduit à des surfaces balayées de plusieurs milliers de mètres carrés. Le rotor transforme l'énergie cinétique du vent en couple mécanique sur l'arbre lent de la turbine [5].

La figure 1.5 représente une pale d'éolienne et son profil aérodynamique.

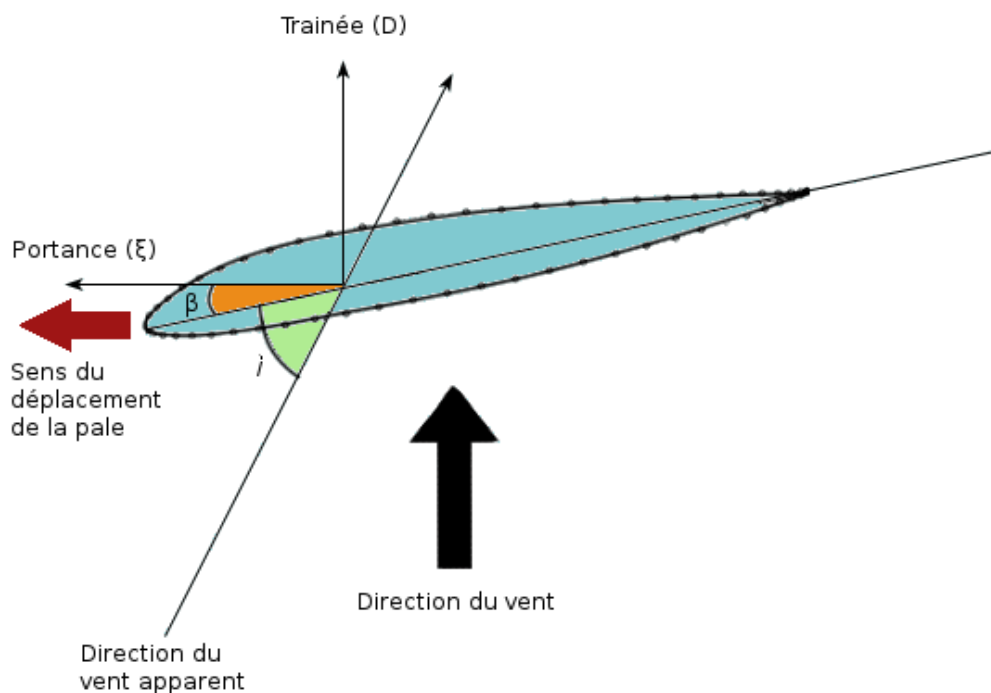


FIGURE 1.5 – Pale d'éolienne avec profil aérodynamique [6].

1.4.2 Nacelle et multiplicateur

La nacelle abrite l'ensemble des composants mécaniques et électriques principaux : arbre lent, multiplicateur de vitesse, arbre rapide, génératrice, système de freinage, convertisseurs électroniques, dispositifs de refroidissement, etc. Elle est montée au sommet de la tour et peut pivoter autour de l'axe vertical pour orienter le rotor face au vent (système de yaw) [8]. Le multiplicateur mécanique (ou gearbox) a pour rôle d'augmenter la vitesse de rotation de l'arbre lent (quelques dizaines de tours par minute) à une vitesse compatible avec celle de la génératrice (souvent de l'ordre de 1000 à 1500 tr/min pour une machine 4 pôles à 50 Hz). Le rapport de multiplication dépend du dimensionnement de la chaîne de conversion et des caractéristiques de la génératrice [1].

1.4.3 Génératrice et électronique de puissance

Selon l'architecture retenue, la génératrice peut être :

- une machine asynchrone à cage (vitesse fixe ou quasi fixe),
- une machine asynchrone à double alimentation (MADA),
- une machine synchrone à aimants permanents,
- plus rarement, une machine synchrone excitée.

Dans le cas étudié dans ce mémoire, la génératrice est une MADA. Le stator est connecté directement au réseau, tandis que le rotor est alimenté via un convertisseur électronique bidirectionnel de type “back-to-back”. Cette configuration permet le fonctionnement à vitesse variable autour de la vitesse de synchronisme, tout en limitant la puissance transitant dans le convertisseur à une fraction (20 à 30 %) de la puissance nominale [5].

L'électronique de puissance, associée à des algorithmes de commande avancés, assure :

- le contrôle des puissances active et réactive échangées avec le réseau,
- le respect des contraintes de tension et de courant,
- la mise en sécurité de l'installation en cas de défaut réseau.

1.4.4 Tour, fondations et systèmes auxiliaires

La tour, généralement tubulaire en acier, supporte la nacelle et le rotor à une hauteur où le vent est plus fort et plus régulier. Sa conception doit tenir compte des charges statiques et dynamiques, des phénomènes de fatigue et des contraintes de transport et de montage [6].

Les fondations, souvent en béton armé, assurent la stabilité de l'ensemble. Des systèmes auxiliaires complètent la structure :

- systèmes de mesure (anémomètre, girouette, capteurs de vibrations et de température),
- systèmes de freinage mécanique et aérodynamique,
- dispositifs de surveillance et de télégestion (SCADA) [8].

La figure 1.6 présente la structure globale d'une éolienne et ses principaux constituants.

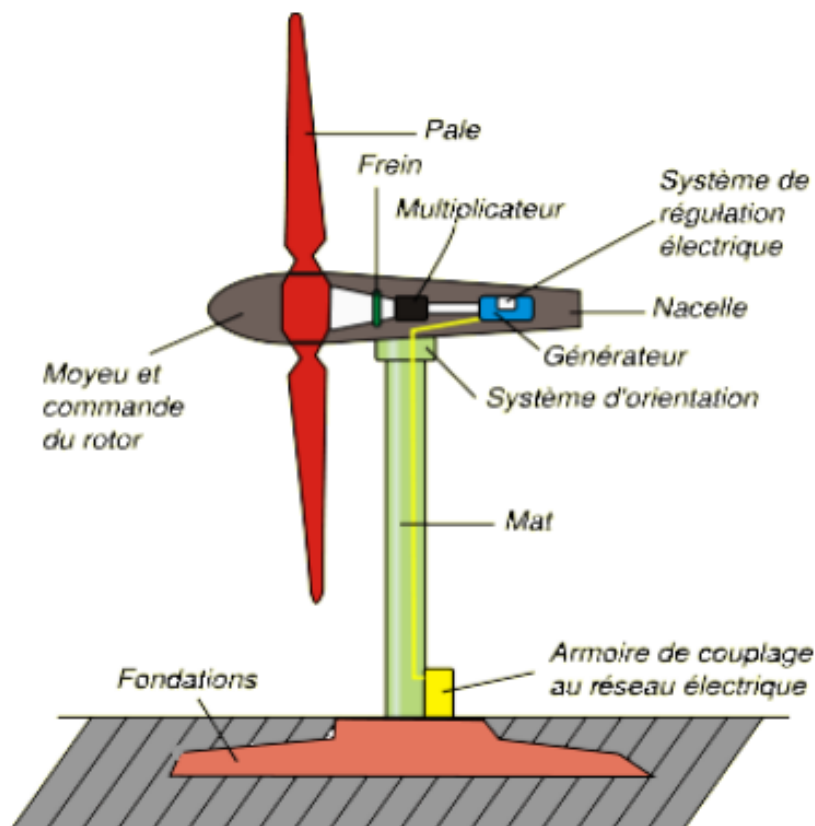


FIGURE 1.6 – Schéma de la structure globale d'une éolienne : rotor, nacelle, multiplicateur, génératrice, convertisseurs, tour et fondations [6].

1.5 Typologie des éoliennes et architectures de conversion

1.5.1 Classification selon la géométrie du rotor

On distingue principalement deux grandes familles d'éoliennes selon la disposition de l'axe de rotation [6].

- **Éoliennes à axe horizontal (HAWT)** : le rotor est orienté face au vent, l'axe de rotation est horizontal. C'est la configuration dominante pour la production d'électricité à grande échelle.

La figure 1.7 compare une éolienne à axe horizontal et une éolienne à axe vertical.

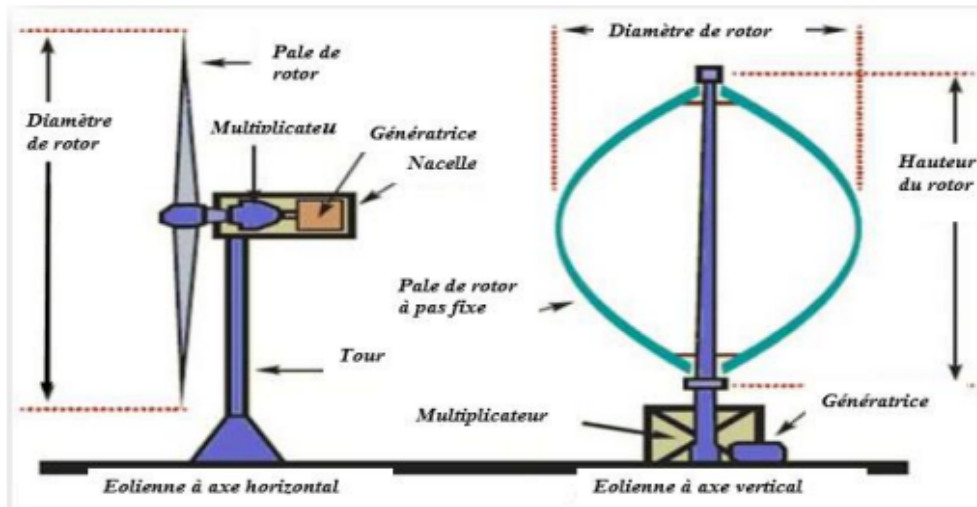


FIGURE 1.7 – Comparaison schématique entre une éolienne à axe horizontal et une éolienne à axe vertical [1].

- **Éoliennes à axe vertical (VAWT)** : le rotor tourne autour d'un axe vertical. Les machines de type Darrieus ou Savonius entrent dans cette catégorie. Elles présentent certains avantages (génératrice au sol, insensibilité à la direction du vent) mais des rendements aérodynamiques plus faibles et des contraintes mécaniques spécifiques.

1.5.2 Vitesse fixe et vitesse variable

Du point de vue électrotechnique, les systèmes éoliens peuvent être classés selon le mode de fonctionnement de la génératrice.

- **Systèmes à vitesse fixe** : la génératrice (souvent une machine asynchrone à cage) est directement reliée au réseau. La vitesse de rotation est imposée par la fréquence du réseau et le nombre de pôles de la machine. Ces systèmes sont simples et robustes, mais ils ne permettent pas d'optimiser en permanence la puissance extraite du vent.
- **Systèmes à vitesse variable** : un convertisseur d'électronique de puissance permet de découpler la vitesse de la génératrice de la fréquence du réseau. On peut ainsi adapter la vitesse de rotation à la vitesse du vent pour maintenir le fonctionnement proche du point de puissance maximale. Ce type de fonctionnement est aujourd'hui largement privilégié dans les grandes installations.

1.5.3 Place de la MADA dans les architectures vitesse variable

Parmi les différentes architectures à vitesse variable, la MADA occupe une place particulière. Sa structure typique est la suivante [5] :

- stator connecté directement au réseau,
- rotor alimenté par un convertisseur AC/DC/AC bidirectionnel,
- possibilité de fonctionnement en sous-synchrone et sur-synchrone,
- commande indépendante des puissances active et réactive.

L'un des principaux avantages de la MADA est que le convertisseur ne traite qu'une fraction de la puissance totale (proportionnelle au glissement), généralement de l'ordre de 20 à 30 %. Cela se traduit par [5] :

- des pertes plus faibles dans l'électronique de puissance,
- un coût réduit par rapport aux solutions à convertisseur pleine puissance,
- une meilleure efficacité globale du système.

En contrepartie, la MADA nécessite une modélisation et une commande plus complexes, notamment en régime dynamique. Ces aspects seront développés en détail dans les chapitres suivants.

La figure 1.8 illustre le principe d'une chaîne de conversion éolienne à base de MADA.

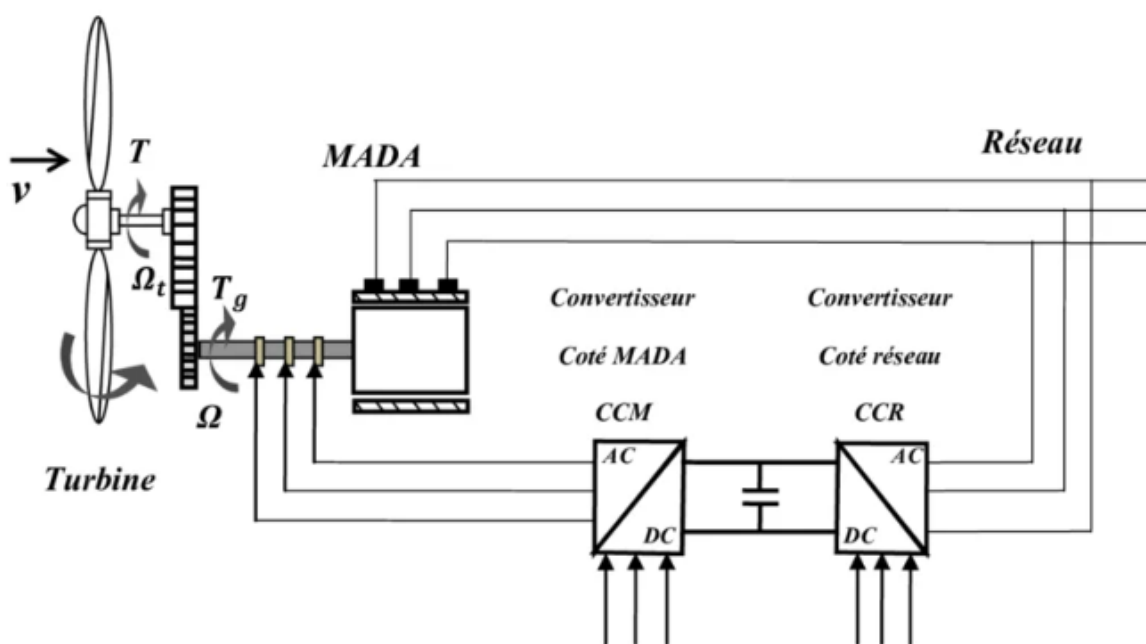


FIGURE 1.8 – Schéma de principe d'une chaîne de conversion éolienne à base de MADA [5].

1.6 Avantages et limites de l'énergie éolienne

1.6.1 Avantages

L'énergie éolienne présente plusieurs avantages majeurs [6].

- **Ressource renouvelable** : le vent est une ressource inépuisable à l'échelle humaine, générée par le rayonnement solaire et la rotation de la Terre.
- **Faible impact environnemental** : en phase d'exploitation, une éolienne ne produit ni émissions de CO_2 ni déchets dangereux. Son bilan carbone global, en tenant compte de la fabrication et du démantèlement, est nettement meilleur que celui des centrales thermiques.
- **Coûts compétitifs** : grâce aux économies d'échelle et aux progrès technologiques, le coût du kWh éolien a fortement diminué au cours des deux dernières décennies, au point de devenir compétitif, voire inférieur, à celui des filières conventionnelles dans de nombreux pays.
- **Modularité et rapidité de déploiement** : les parcs éoliens peuvent être construits progressivement, avec des délais de réalisation relativement courts par rapport aux grandes centrales thermiques ou nucléaires.

1.6.2 Limites et contraintes

Malgré ses atouts, l'énergie éolienne présente également certaines limites.

- **Intermittence et variabilité** : la production dépend directement des conditions météorologiques. L'intégration de grandes quantités d'éolien dans un réseau électrique nécessite donc des moyens de flexibilité (stockage, effacement de la demande, centrales pilotables).
- **Impacts paysagers et acoustiques** : la présence d'éoliennes modifie le paysage et peut susciter des oppositions locales. Les émissions sonores, bien que généralement limitées par la réglementation, doivent être prises en compte lors du choix des sites.
- **Contraintes techniques de raccordement** : les parcs éoliens doivent respecter des codes de raccordement stricts en matière de qualité de l'énergie, de support de tension et de contribution à la stabilité du réseau.

Ces limites ne remettent pas en cause l'intérêt de l'éolien, mais imposent une approche globale associant planification, choix technologiques adaptés et développement de solutions de commande avancées, comme celles basées sur la MADA.

1.7 Potentiel éolien en Algérie

Les études de cartographie du vent réalisées en Algérie montrent que le territoire présente des ressources éoliennes très hétérogènes. Les vitesses moyennes de vent sont généralement modestes sur la bande côtière, mais deviennent nettement plus intéressantes sur les Hauts Plateaux et surtout dans les régions sahariennes [1].

Les cartes de vitesse moyenne du vent à m et m de hauteur indiquent que des régions telles qu'Adrar, Tindouf, Béchar ou encore In Salah disposent de vitesses annuelles moyennes pouvant dépasser m/s, ce qui est très favorable au développement de parcs éoliens de forte puissance. D'autres zones présentent un potentiel adapté à des applications plus modestes, comme le pompage d'eau ou l'alimentation de sites isolés.

La figure 1.9 présente la carte de la vitesse moyenne annuelle du vent en Algérie.

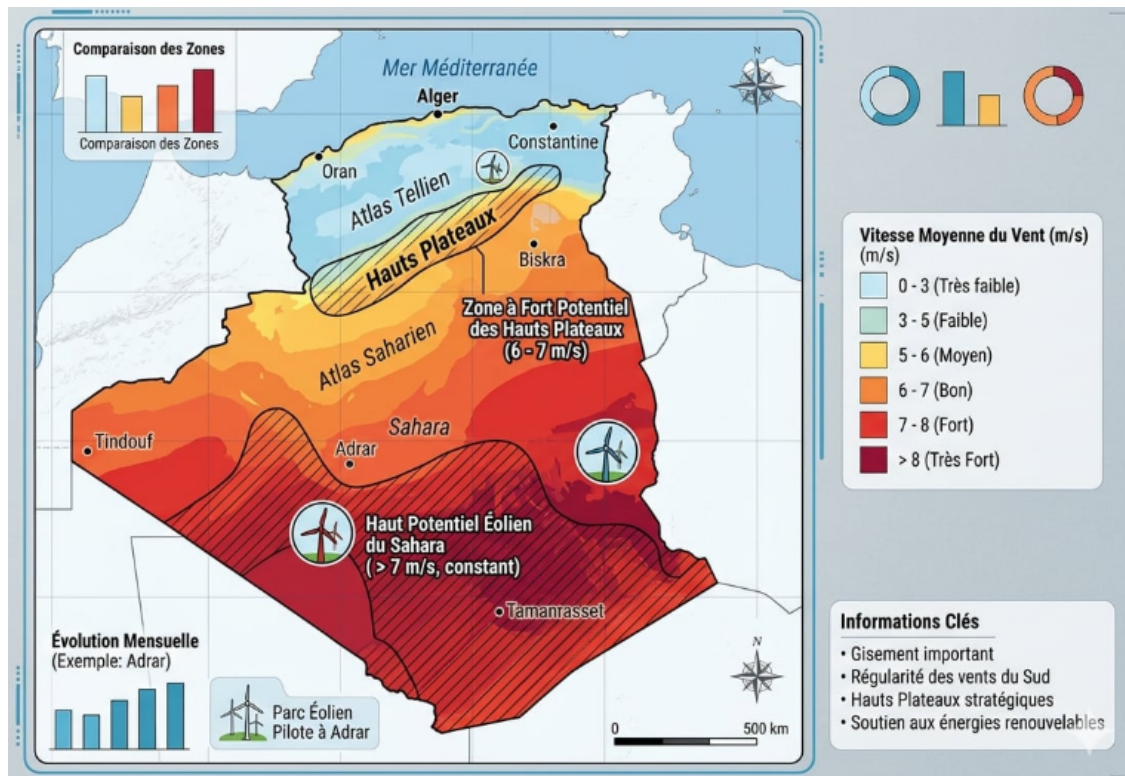


FIGURE 1.9 – Carte de la vitesse moyenne annuelle du vent en Algérie, avec mise en évidence des zones à fort potentiel [2].

Le programme national de développement des énergies renouvelables vise à intégrer progressivement une part significative d'éolien dans le mix électrique algérien, en complément du solaire photovoltaïque et thermique. Dans cette perspective, la maîtrise des technologies de conversion éolienne, en particulier celles basées sur la MADA, constitue un enjeu stratégique pour les laboratoires et les industriels du pays.

1.8 Conclusion

Dans ce premier chapitre, les fondements de l'énergie éolienne et du contexte énergétique dans lequel elle s'inscrit ont été présentés. Après avoir introduit les enjeux liés à la croissance de la demande électrique et à la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre, les principes physiques de la conversion de l'énergie du vent en énergie mécanique ont été détaillés.

Les principaux composants d'une éolienne moderne ont été décrits, ainsi que les différentes architectures de conversion possibles. Il ressort de cette analyse que les systèmes à vitesse variable, et en particulier ceux basés sur la machine asynchrone à double alimentation, offrent un compromis très intéressant entre performances, flexibilité de commande et coût de l'électronique de puissance [5].

Enfin, le potentiel éolien spécifique de l'Algérie a été discuté, mettant en évidence l'intérêt particulier des régions sahariennes pour le développement de parcs éoliens de moyenne et grande puissance. Ces éléments justifient pleinement l'étude approfondie de la modélisation et de la commande d'une MADA alimentée par une turbine éolienne, qui fera l'objet des chapitres suivants.

Chapitre 2

Modélisation de la Turbine Éolienne et de la MADA

2.1 Introduction

La conversion de l'énergie éolienne en électricité fait intervenir une chaîne de sous-systèmes en interaction étroite : turbine aérodynamique, transmission mécanique, machine électrique et convertisseurs statiques. Pour concevoir et évaluer une commande vectorielle performante, il est indispensable de disposer de modèles mathématiques fidèles, couvrant chacun de ces maillons [1,6].

Ce chapitre établit, de manière progressive, les équations gouvernant chaque élément de la chaîne de conversion. La première partie est consacrée à la turbine éolienne : modèle aérodynamique, coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$, dynamique mécanique et stratégie d'extraction de puissance maximale (MPPT). La deuxième partie traite de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) : son principe de fonctionnement, sa mise en équation dans le repère triphasé (abc), puis sa transformation dans le repère diphasé tournant (d-q) via la transformation de Park, qui constitue le fondement de la commande vectorielle développée au chapitre suivant [5,7]. La troisième partie modélise les convertisseurs statiques côté rotor (RSC) et côté réseau (GSC), ainsi que le bus continu intermédiaire.

L'ensemble de ces modèles sera implémenté sous MATLAB/Simulink pour valider par simulation les performances de la commande synthétisée. Les principales sources bibliographiques utilisées pour cette synthèse ont été collectées via des bases de données scientifiques reconnues (IEEE Xplore, ScienceDirect, etc.).

2.2 Modélisation de la turbine éolienne

L'étude de la modélisation aérodynamique et mécanique d'une éolienne nécessite, au préalable, de disposer d'un modèle du vent, source primaire d'énergie de la chaîne de conversion.

2.2.1 Modélisation du vent

Afin de déterminer les conditions de fonctionnement des éoliennes, les efforts exercés sur les pales ainsi que le potentiel énergétique exploitable, il est nécessaire de disposer d'un modèle mathématique du vent. Bien que le vent puisse être représenté comme une grandeur aléatoire caractérisée par des paramètres statistiques, son évolution est ici modélisée sous une forme déterministe, par la somme de plusieurs composantes harmoniques [4,19], comme le montre l'équation 2.1 :

$$V_{vent}(t) = 8 + 0,2 \sin(0,1047 t) + 2 \sin(0,2665 t) + 0,2 \sin(3,6645 t) \quad (2.1)$$

La figure 2.1 représente la variation temporelle de la vitesse du vent simulée.

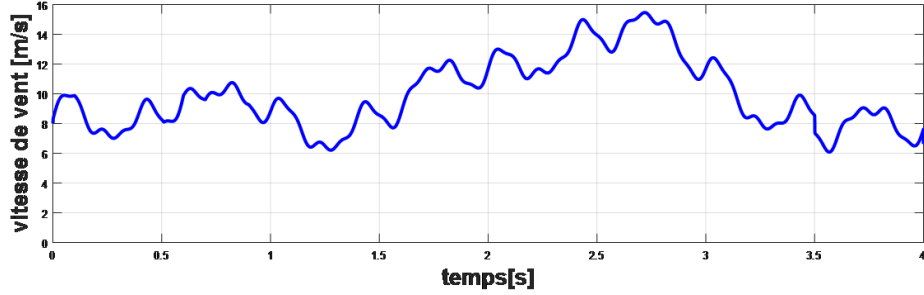


FIGURE 2.1 – Profil de vitesse du vent simulé. [19]

2.2.2 Modèle aérodynamique

L'extraction de l'énergie cinétique du vent par une éolienne peut être décrite à partir de la théorie de Betz, qui permet d'établir l'expression de la puissance aérodynamique captée par l'éolienne. La puissance disponible dans le vent s'écrit :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 \quad (2.2)$$

où v est la vitesse du vent (m/s), ρ la masse volumique de l'air ($\approx 1,225 \text{ kg/m}^3$ à la pression atmosphérique et à 15°C) et R le rayon du rotor de l'éolienne (m). L'éolienne ne récupère qu'une fraction de la puissance du vent ; la puissance aérodynamique disponible au niveau du rotor s'exprime en fonction du coefficient de puissance :

$$P_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2.3)$$

où C_p est le coefficient de puissance (ou coefficient de performance), qui représente l'efficacité aérodynamique de l'éolienne et dépend des caractéristiques de la turbine (dimensions des pales, rapport de vitesse et angle d'orientation des pales). La vitesse spécifique λ est définie comme le rapport entre la vitesse linéaire en bout de pale et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{v} \quad (2.4)$$

Ω_t étant la vitesse mécanique de l'arbre de la turbine. Le couple exercé par le vent sur l'arbre de la turbine est défini par :

$$T_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 v^2}{2 \Omega_t} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 C_t(\lambda, \beta) \quad (2.5)$$

où C_t représente le coefficient de couple.

Le coefficient de puissance C_p mesure l'efficacité avec laquelle l'éolienne convertit l'énergie du vent en énergie électrique. Différentes approximations numériques ont été proposées dans la littérature pour le simuler. L'approximation issue des travaux de Siegfried Heier, basée sur des données expérimentales pour des éoliennes à deux ou trois pales en rotation, exprime $C_p = f(\lambda, \beta)$ sous la forme empirique :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0,5 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0,4\beta - 5 \right) \exp\left(\frac{-21}{\lambda_i}\right) + 0,0068 \lambda \quad (2.6)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (2.7)$$

Lorsque l'éolienne est à l'arrêt ($\Omega_t = 0$), la vitesse relative est nulle et la puissance de la turbine P_t est nulle. Le coefficient C_p augmente avec le rapport de vitesse λ jusqu'à atteindre une valeur maximale, puis diminue. Il peut même devenir négatif pour des valeurs de λ très élevées : la turbine entre alors en mode « propulsion » et transfère l'énergie mécanique de son arbre vers l'atmosphère. La figure 2.2 montre la courbe de variation du coefficient de puissance C_p .

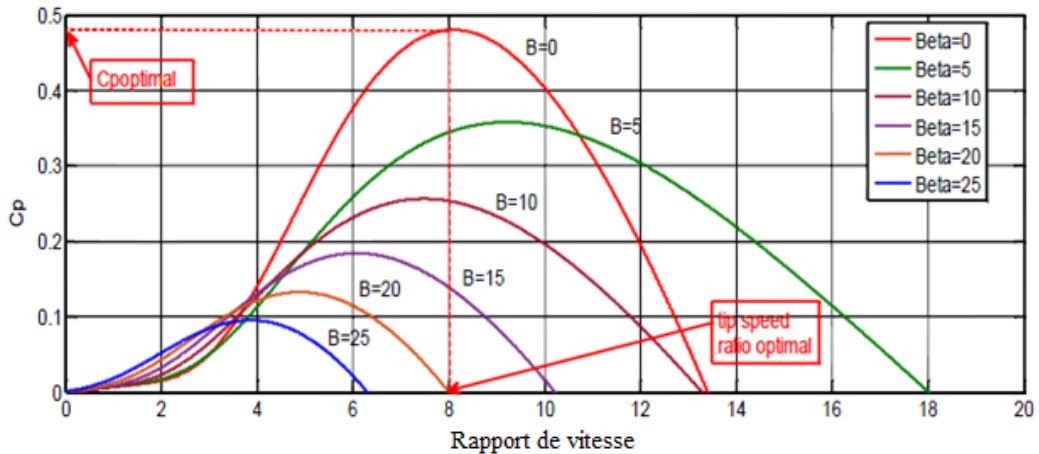


FIGURE 2.2 – Courbe du coefficient de puissance C_p . [19]

On remarque que pour chaque angle de calage β , il existe une valeur maximale de C_p correspondant à un rapport de vitesse optimal. Par exemple, pour un angle de calage nul ($\beta = 0$), le coefficient atteint une valeur maximale $C_{p,max} = 0,48$ pour un rapport de vitesse optimal $\lambda_{opt} = 8$.

2.2.3 Modélisation de la partie mécanique

La figure 2.3 représente le modèle mécanique de l'éolienne, constitué de trois pales de longueur R fixées sur un arbre d'entraînement tournant à la vitesse Ω_t et reliées à un multiplicateur de vitesse de gain G , lequel entraîne la génératrice électrique à la vitesse Ω_g .



FIGURE 2.3 – Modèle mécanique de l'éolienne [19].

Avec :

- J_t : moment d'inertie de la turbine (équivalent aux trois pales) ;
- J_g : moment d'inertie de la génératrice ;
- f_{vis} : coefficient de frottement visqueux ;
- C_g : couple appliqué sur l'arbre de la génératrice après le multiplicateur ;
- Ω_g : vitesse de rotation de la génératrice ;
- G : gain du multiplicateur de vitesse.

La boîte de vitesses relie et adapte la vitesse de rotation de la turbine (arbre lent) à celle de la génératrice (arbre rapide). Supposée rigide, de gain constant, sans flexibilité ni pertes, elle est décrite par les relations :

$$T_g = \frac{T_t}{G}, \quad \Omega_t = \frac{\Omega_g}{G} \quad (2.8)$$

L'inertie totale, ramenée sur l'arbre de la génératrice, regroupe l'inertie de la génératrice et celle de la turbine rapportée à ce même arbre :

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g \quad (2.9)$$

L'inertie du rotor de la génératrice étant très faible devant celle de la turbine, l'évolution de la vitesse mécanique dépend du couple appliqué à la génératrice, résultante du couple aérodynamique ramené, du couple électromagnétique et du couple de frottement visqueux :

$$J \frac{d\Omega_g}{dt} = T_{mec} = T_g - T_{em} - T_{vis} \quad (2.10)$$

Le couple résultant des frottements est modélisé par le coefficient de frottement visqueux f_{vis} :

$$T_{vis} = f_{vis} \Omega_g \quad (2.11)$$

La figure 2.4 illustre le diagramme bloc du modèle de la turbine : le rotor capte l'énergie du vent et génère un couple aérodynamique dépendant de la vitesse du vent et de l'angle d'orientation des pales ; le multiplicateur de vitesse transforme ce couple en l'adaptant au niveau de la génératrice, tout en convertissant la vitesse Ω_t en Ω_g . La vitesse du vent v est considérée comme une perturbation externe agissant sur le système.

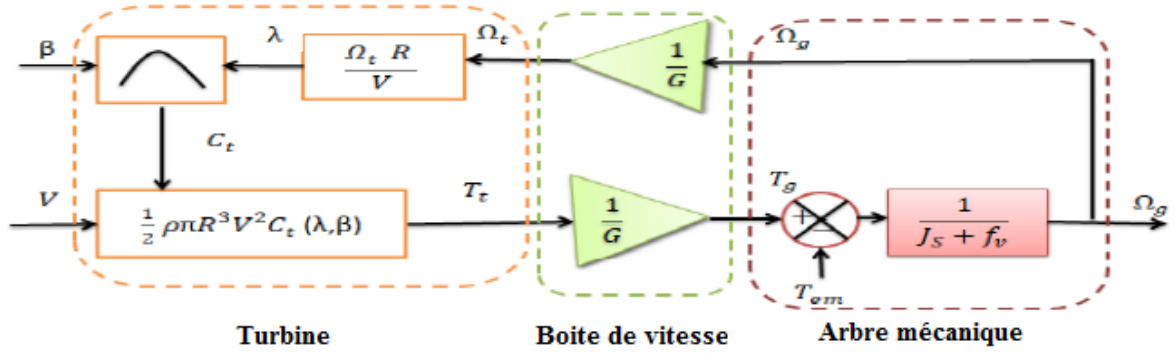


FIGURE 2.4 – Diagramme bloc du modèle de la turbine. [19]

2.3 Commande de l'éolienne

La régulation mécanique d'une éolienne a pour objectif, d'une part, d'assurer l'extraction maximale de l'énergie disponible dans le vent et, d'autre part, de garantir la sécurité de l'installation par vents violents en limitant l'énergie captée. La puissance nominale P_n est obtenue lorsque la vitesse du vent atteint sa valeur nominale V_n ; au-delà, l'éolienne doit adapter son fonctionnement afin d'éviter toute détérioration mécanique. On distingue quatre zones principales de fonctionnement :

- **Zone I (faibles vitesses de vent)** : la vitesse du vent est très inférieure à la vitesse nominale ($V_{vent} \ll V_n$). L'énergie disponible reste insuffisante pour produire une puissance exploitable ($P \approx 0$) ; aucune stratégie de commande n'est appliquée.
- **Zone II (fonctionnement à charge partielle)** : à partir de la vitesse de démarrage V_d (*cut-in*, comprise entre 2,5 et 4 m/s) et jusqu'à la vitesse nominale V_n , l'objectif est d'extraire le maximum de puissance disponible. Une stratégie **MPPT** (*Maximum Power Point Tracking*) contrôle le couple électromagnétique de la MADA et régule la

vitesse de rotation. L'angle de calage est maintenu à sa valeur minimale ($\beta = 0$).

- **Zone III (fonctionnement à puissance nominale)** : pour des vitesses de vent supérieures à V_n , la puissance est limitée à sa valeur nominale P_n en orientant les pales (augmentation de l'angle de calage β), ce qui réduit l'efficacité aérodynamique. Cette technique est appelée commande par variation du pas des pales.
- **Zone IV (arrêt de sécurité)** : lorsque la vitesse du vent dépasse la valeur maximale admissible V_m (*cut-off*), les pales sont mises en drapeau ($\beta = 90^\circ$); la turbine est arrêtée et la puissance extraite devient nulle ($P = 0$).

2.3.1 Stratégie de maximisation de la puissance (MPPT)

Pour maximiser la puissance, il est nécessaire de maintenir le coefficient C_p à sa valeur maximale, ce qui revient à maintenir le rapport de vitesse spécifique λ à sa valeur optimale λ_{opt} . La puissance optimale extraite s'écrit alors :

$$P_t^{opt} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_{p,max}(\lambda_{opt}, \beta_{opt}) \quad (2.12)$$

La stratégie retenue est une **MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation**. Appliquée à la génératrice DFIG, elle consiste à maintenir la vitesse mécanique Ω_g proche d'une vitesse de référence Ω_g^* , en agissant sur le couple électromagnétique T_{em} , afin d'extraire la puissance maximale disponible au niveau de la turbine. La vitesse de référence Ω_g^* est choisie de manière à maintenir C_p à sa valeur maximale, en imposant le rapport de vitesse optimal λ_{opt} :

$$\Omega_t^* = \frac{\lambda_{opt} v}{R}, \quad \Omega_g^* = G \Omega_t^* \quad (2.13)$$

Le couple électromagnétique de la machine est régulé afin d'assurer l'atteinte de la vitesse de référence. Une relation indirecte permet de déterminer le couple électromagnétique de référence délivré par le régulateur de vitesse R_Ω :

$$T_{em} = T_{em}^*, \quad T_{em}^* = R_\Omega (\Omega_g^* - \Omega_g) \quad (2.14)$$

La figure 2.5 représente le diagramme bloc du modèle de la turbine commandé par un régulateur PI.

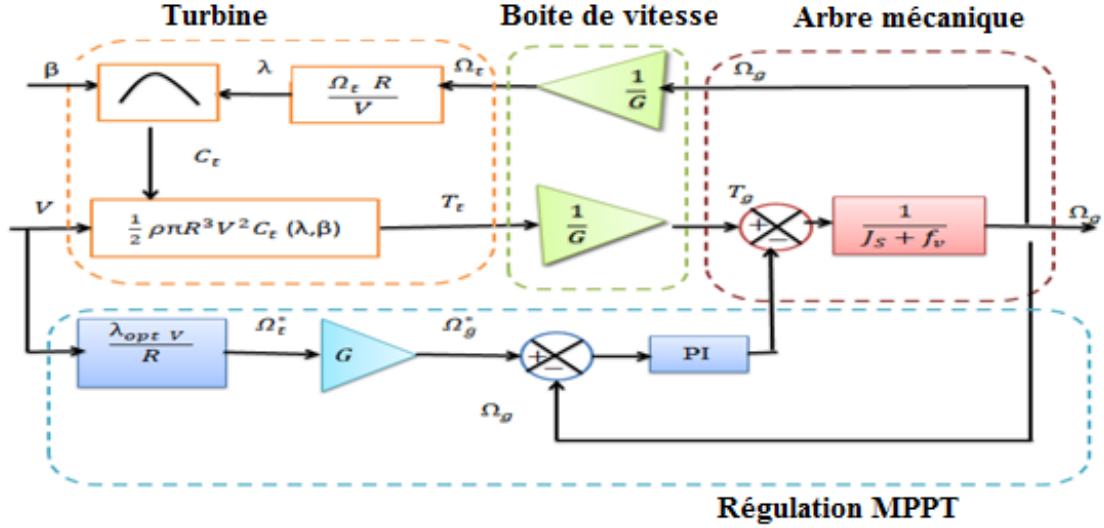


FIGURE 2.5 – Schéma bloc du modèle de la turbine contrôlé par un régulateur PI. [19]

Chaque boucle de commande est équipée d'un régulateur classique de type proportionnel-intégral (PI) : l'action proportionnelle ajuste la rapidité de la réponse, tandis que l'action intégrale supprime l'erreur statique entre la grandeur régulée et sa consigne. Afin de limiter le dépassement du couple, une saturation de la référence de couple est introduite à la sortie du correcteur. La figure 2.6 illustre la structure du régulateur de vitesse.

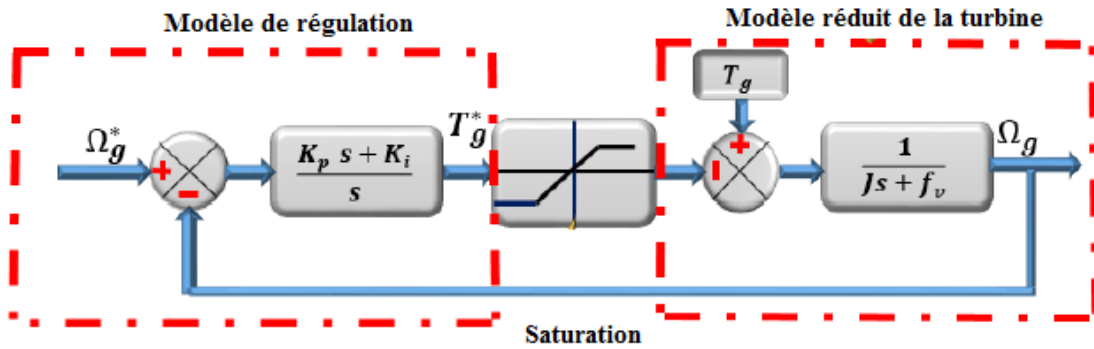


FIGURE 2.6 – Schéma bloc de la régulation de la vitesse de rotation. [19]

La fonction de transfert en boucle fermée reliant la vitesse à sa référence et à la perturbation de couple T_g s'écrit $\Omega_g = F(s) \Omega_g^* + G(s) T_g$, avec :

$$F(s) = \frac{K_{p\Omega} s + K_{i\Omega}}{J s^2 + (f_v + K_{p\Omega}) s + K_{i\Omega}} \quad (2.15)$$

$$G(s) = \frac{s}{J s^2 + (f_v + K_{p\Omega}) s + K_{i\Omega}} \quad (2.16)$$

L'identification du dénominateur à la forme canonique d'un second ordre de pulsation propre ω_n et d'amortissement ξ fournit :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_{i\Omega}}{J}}, \quad \xi = \frac{f_v + K_{p\Omega}}{2J\omega_n} \quad (2.17)$$

En choisissant un gain proportionnel suffisamment élevé pour réduire l'influence de la perturbation T_g , les gains du régulateur sont déterminés par :

$$K_{i\Omega} = \omega_n^2 J, \quad K_{p\Omega} = 2\xi J\omega_n - f_v \quad (2.18)$$

2.3.2 Résultats de simulation de la commande de la turbine

Le système éolien de 4 kW a été simulé. Les figures 2.7 à 2.10 illustrent les résultats de la stratégie de commande basée sur l'asservissement de vitesse.

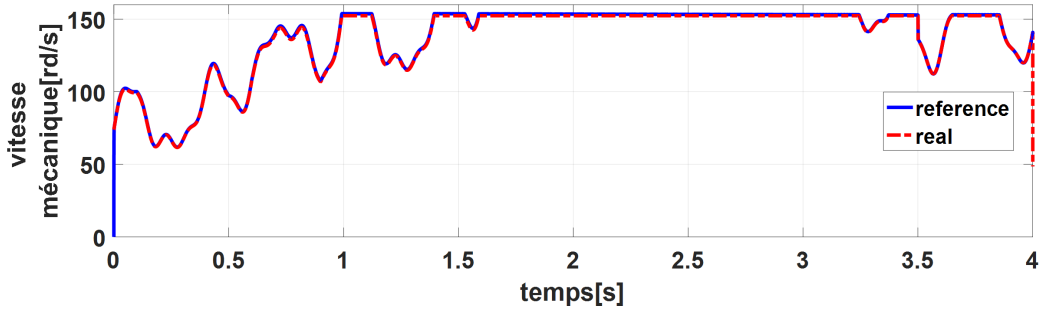


FIGURE 2.7 – Vitesse mécanique : référence et valeur réelle. [19]

La figure 2.7 montre que la commande en boucle fermée assure un bon suivi de la vitesse, aussi bien en régime transitoire qu'en régime permanent.

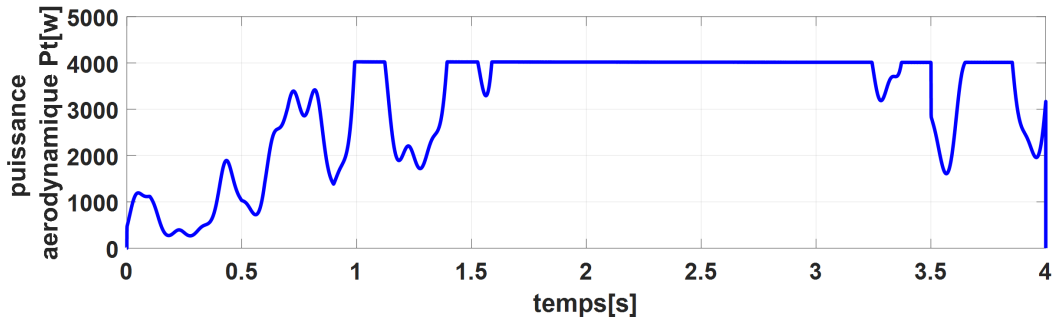
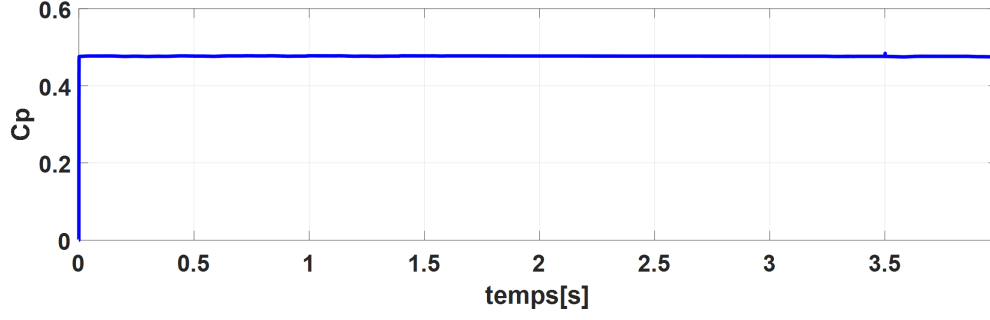
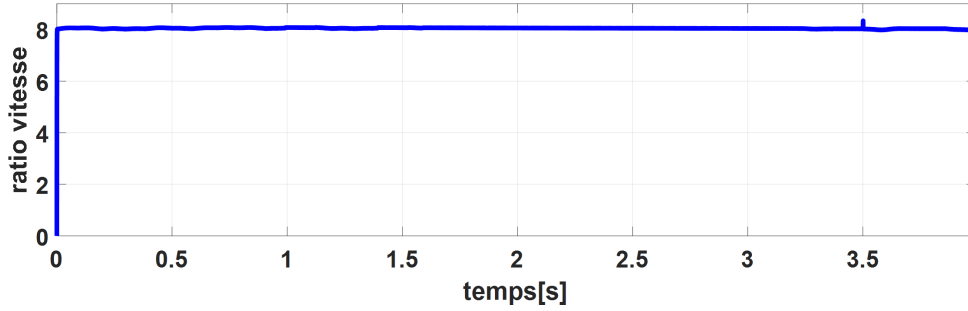


FIGURE 2.8 – Puissance aérodynamique. [19]

La figure 2.8 (puissance aérodynamique) met en évidence qu'une faible variation de la vitesse du vent entraîne une variation importante de la puissance extraite, celle-ci étant proportionnelle au cube de la vitesse du vent.

FIGURE 2.9 – Coefficient de puissance C_p . [19]FIGURE 2.10 – Rapport de vitesse λ . [19]

Les figures 2.9 et 2.10 confirment que l'objectif de commande est atteint : l'efficacité aérodynamique est maintenue proche de sa valeur maximale sur toute la plage de vitesses de vent, grâce à l'imposition du rapport de vitesse optimal.

2.4 Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)

La Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA), ou DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) dans la littérature anglophone, est aujourd'hui la machine électrique de référence pour les éoliennes de moyenne et grande puissance. Sa structure particulière, combinant un stator directement connecté au réseau et un rotor alimenté via des convertisseurs statiques, lui confère des propriétés de contrôle exceptionnelles [5, 7].

2.4.1 Description et principe de fonctionnement

La MADA est une machine à induction dont le stator triphasé est connecté directement au réseau électrique à fréquence fixe (50 Hz en Algérie et en Europe). Le rotor, également triphasé et bobiné (rotor bobiné, contrairement à la cage d'écureuil), est accessible par des bagues et des balais, ce qui permet de lui injecter ou d'en extraire une tension variable en amplitude et en fréquence par l'intermédiaire d'un convertisseur de fréquence [5, 12]. Le

principe de fonctionnement est basé sur la notion de glissement g , qui est le rapport entre la fréquence de rotation du champ magnétique statorique et la fréquence de rotation du rotor :

$$g = \frac{W_s - W_r}{W_s} \iff W_s - W_r = g W_s \quad (2.19)$$

où $W_s = \frac{2\pi f_s}{p}$ est la vitesse de synchronisme ($f_s = 50$ Hz, p = nombre de paires de pôles) et W_r est la vitesse angulaire électrique du rotor. La MADA peut fonctionner dans trois modes distincts selon le signe du glissement :

- **Mode sous-synchrone** ($g > 0, W_r < W_s$) : la machine tourne moins vite que la vitesse de synchronisme.
- **Mode synchrone** ($g = 0, W_r = W_s$) : la machine tourne exactement à la vitesse de synchronisme ; le glissement est nul et le rotor est alimenté en courant continu.
- **Mode super-synchrone** ($g < 0, W_r > W_s$) : la machine dépasse la vitesse de synchronisme. Le rotor délivre de la puissance au réseau via le convertisseur RSC. C'est le mode de fonctionnement dominant dans la plupart des éoliennes par vent fort [5, 7, 12].

2.4.2 Avantages de la MADA dans les systèmes éoliens

La MADA permet un fonctionnement à vitesse variable dans une plage typique de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme, ce qui est essentiel pour optimiser l'extraction de puissance éolienne par MPPT. Elle s'est ainsi imposée comme la solution dominante pour les éoliennes de puissance supérieure à 1 MW. Les convertisseurs statiques ne traitent qu'une fraction de la puissance totale (typiquement 25 à 30%), ce qui réduit considérablement leur coût et leurs pertes par rapport à une machine à cage totalement convertie.

Troisièmement, la commande vectorielle permet de contrôler indépendamment la puissance active et la puissance réactive injectées dans le réseau, ce qui facilite le respect des exigences de raccordement (grid codes). Quatrièmement, la machine peut participer à la régulation de tension du réseau en modulant sa puissance réactive. Parmi les inconvénients, on note la présence de bagues et balais nécessitant un entretien régulier, ainsi que la sensibilité aux creux de tension du réseau (LVRT : Low Voltage Ride Through), qui nécessite des protections spécifiques [12].

2.4.3 Mise en équation électrique dans le repère triphasé (abc)

Le stator, tout comme le rotor, est composé de trois enroulements répartis spatialement et décalés d'un angle électrique de 120° . Cette configuration, illustrée par la figure (II.5), pré-

sente la MADA comme un système électromagnétique complexe à six enroulements couplés : trois phases statoriques (a, b, c) et trois phases rotoriques (A, B, C). En appliquant la loi de Kirchhoff à chacun de ces enroulements, on établit les équations électriques du système dans le repère naturel triphasé.

Les équations de tension statoriques s'écrivent :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d[\Phi_s]}{dt} \quad (2.20)$$

où $[V_s] = [V_{as}, V_{bs}, V_{cs}]^T$ est le vecteur des tensions de phase statoriques, $[I_s] = [I_{as}, I_{bs}, I_{cs}]^T$ est le vecteur des courants statoriques, $[R_s] = \text{diag}(R_s, R_s, R_s)$ est la matrice résistance statorique et $[\Phi_s]$ est le vecteur des flux statoriques totaux.

De même, les équations de tension rotoriques sont :

$$[V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d[\Phi_r]}{dt} \quad (2.21)$$

où $[V_r] = [V_{AR}, V_{BR}, V_{CR}]^T$ est le vecteur des tensions rotoriques imposées par le convertisseur RSC, $[I_r]$ et $[\Phi_r]$ étant respectivement les courants et flux rotoriques. Les matrices de flux font intervenir les inductances propres et les inductances mutuelles stator-rotor, lesquelles varient avec l'angle électrique θ_r du rotor :

$$[\Phi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}(\theta_r)] \cdot [I_r] \quad (2.22)$$

$$[\Phi_r] = [M_{rs}(\theta_r)] \cdot [I_s] + [L_{rr}] \cdot [I_r] \quad (2.23)$$

La variation périodique des inductances mutuelles avec θ_r rend ce système d'équations non linéaire et à coefficients variables dans le temps, ce qui complique considérablement l'analyse et la synthèse de la commande. C'est précisément pour s'affranchir de cette difficulté que l'on recourt à la transformation de Park [7, 13].

2.4.4 Transformation de Park (Repère d-q)

La transformation de Park, introduite par R.H. Park en 1929, est un changement de variable mathématique qui transforme les grandeurs triphasées variables en grandeurs diphasées constantes (en régime permanent), en projetant les vecteurs statoriques et rotoriques sur un repère tournant à la vitesse angulaire W_s du champ statorique [7, 13].

La matrice de transformation de Park pour une grandeur triphasée $[x_a, x_b, x_c]^T$ est :

$$P(\theta) = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

où $\theta = W_s \cdot t$ est l'angle du repère tournant par rapport à un axe de référence fixe. En appliquant cette transformation aux équations statoriques et rotoriques, on obtient un système d'équations à coefficients constants (en régime permanent), ce qui simplifie considérablement la synthèse des régulateurs [7, 13].

Le repère d-q est orienté par rapport au vecteur flux statorique Φ_s . Cette orientation, appelée Field Oriented Control (FOC) ou commande par orientation du flux statorique, aligne l'axe d avec le vecteur flux statorique, de sorte que :

$$\Phi_{ds} = |\Phi_s| = \Phi_s \quad \text{et} \quad \Phi_{qs} = 0 \quad (2.25)$$

Cette condition de désaccouplement est la clé de la commande vectorielle indirecte : elle permet de contrôler séparément la puissance active (via l'axe q) et la puissance réactive (via l'axe d), de manière complètement découplée [5, 7].

2.4.5 Modèle mathématique de la MADA dans le repère de Park

Équations des tensions

Après application de la transformation de Park et orientation du repère sur le flux statorique, les équations de tension de la MADA s'écrivent dans le repère d-q tournant à la vitesse W_s [5, 7, 13] :

Équations de tension statoriques :

$$V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - W_s \cdot \Phi_{qs} \quad (2.26)$$

$$V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + W_s \cdot \Phi_{ds} \quad (2.27)$$

Équations de tension rotoriques :

$$V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (W_s - W_r) \cdot \Phi_{qr} \quad (2.28)$$

$$V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (W_s - W_r) \cdot \Phi_{dr} \quad (2.29)$$

où $(W_s - W_r) = g \cdot W_s$ est la pulsation de glissement, R_s et R_r sont les résistances

statorique et rotorique par phase, et les termes en Ω représentent les forces électromotrices de rotation (FEM de rotation) qui constituent les termes de couplage entre les axes d et q [7, 13].

Équations des flux

Les équations des flux dans le repère d-q font intervenir les inductances cycliques statorique L_s , rotorique L_r et l'inductance magnétisante M [7, 13] :

$$\Phi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \quad (2.30)$$

$$\Phi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \quad (2.31)$$

$$\Phi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \quad (2.32)$$

$$\Phi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} \quad (2.33)$$

où $L_s = l_{fs} + M$ et $L_r = l_{fr} + M$, avec l_{fs} et l_{fr} les inductances de fuites statorique et rotorique respectivement. Ces quatre équations de flux, combinées avec les équations de tension, forment le modèle complet de la MADA dans le repère d-q [7, 13].

En appliquant l'hypothèse d'orientation du flux statorique ($\Phi_{ds} = \Phi_s = \text{constante}$, $\Phi_{qs} = 0$) et en supposant le réseau suffisamment rigide ($V_s = \text{constante}$, $W_s = \text{constante}$), les équations de tension statoriques se simplifient. En négligeant la résistance statorique R_s (hypothèse valable pour les machines de grande puissance), on obtient :

$$V_{ds} \approx 0 \quad \text{et} \quad V_{qs} \approx V_s = W_s \cdot \Phi_s \quad (2.34)$$

ce qui confirme que la tension statorique est entièrement portée par l'axe q dans le repère d'orientation du flux [5, 7].

Équation du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé par la MADA est l'expression du transfert d'énergie mécanique entre le rotor et le stator. Il s'exprime dans le repère d-q par [5, 7, 13] :

$$T_{em} = p \cdot M \cdot (I_{qs} \cdot I_{dr} - I_{ds} \cdot I_{qr}) \quad (2.35)$$

où p est le nombre de paires de pôles de la machine. En appliquant l'orientation du flux

statorique ($\Phi_{qs} = 0 \Rightarrow I_{qs} = -M \cdot I_{qr} / L_s$) et les simplifications associées, le couple se simplifie en une expression directement proportionnelle au courant rotorique en quadrature :

$$T_{em} = -p \cdot (M/L_s) \cdot \Phi_s \cdot I_{qr} \quad (2.36)$$

Cette expression est capitale : elle montre que le couple électromagnétique (et donc la puissance active échangée) est commandé uniquement par la composante I_{qr} du courant rotorique. De même, la puissance réactive statorique est contrôlée par I_{dr} . Ce découplage naturel est la propriété fondamentale qui rend la commande vectorielle par orientation du flux si élégante et efficace [5, 7].

Les puissances active et réactive statoriques s'expriment en fonction des courants rotoriques d-q par :

$$P_s = -\frac{3}{2} V_s \cdot (M/L_s) \cdot I_{qr} \quad (2.37)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} \left(\frac{V_s^2}{W_s \cdot L_s} - V_s \cdot (M/L_s) \cdot I_{dr} \right) \quad (2.38)$$

Ces deux expressions montrent clairement le découplage : P_s est commandé par I_{qr} et Q_s est commandé par I_{dr} . Les références de courants rotoriques dérivées de ces expressions servent de consignes à la commande vectorielle de la MADA [5, 7].

2.4.6 Modèle d'état de la machine

En choisissant les courants rotoriques (I_{dr}, I_{qr}) comme variables d'état et les tensions rotoriques (V_{dr}, V_{qr}) comme entrées de commande, le modèle d'état de la MADA dans le repère d-q s'écrit sous la forme matricielle compacte suivante [5, 7, 13] :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + B \cdot \begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} + E \quad (2.39)$$

avec les matrices définies par :

$$A = \frac{1}{\sigma L_r} \begin{bmatrix} -(R_r + \frac{M^2}{L_s^2} R_s) & g W_s \sigma L_r \\ -g W_s \sigma L_r & -(R_r + \frac{M^2}{L_s^2} R_s) \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

$$B = \frac{1}{\sigma L_r} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

$$E = \frac{1}{\sigma L_r} \begin{bmatrix} 0 \\ -g \frac{M V_s}{L_s} \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

où $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s \cdot L_r}$ est le coefficient de dispersion (ou facteur de fuite totale) de la machine, compris entre 0 et 1. Le vecteur E regroupe les termes de découplage (FEM de rotation) et les perturbations dues à la tension du réseau [5, 7].

Ce modèle d'état met en évidence les termes de couplage entre les axes d et q (termes $gW_s\sigma L_r$ dans la matrice A). Ces termes de couplage seront compensés dans la commande vectorielle par des termes de découplage additionnels, assurant ainsi l'indépendance des deux boucles de régulation [5, 7, 13].

2.5 Modélisation de la chaîne de conversion (Convertisseurs statiques)

La chaîne de conversion électrique de la MADA comprend deux convertisseurs statiques de type VSC (Voltage Source Converter) à structure dos-à-dos (back-to-back), reliés par un bus continu capacitif. Le premier convertisseur, côté rotor (RSC : Rotor Side Converter), commande les courants rotoriques de la MADA et réalise ainsi la commande vectorielle. Le second, côté réseau (GSC : Grid Side Converter), assure la régulation de la tension du bus continu et peut également participer à la régulation de la puissance réactive côté réseau [5, 7, 14].

2.5.1 Structure du convertisseur côté rotor (RSC) et côté réseau (GSC)

Les deux convertisseurs RSC et GSC sont des onduleurs de tension à deux niveaux (2L-VSI), constitués de six interrupteurs électroniques commandables (généralement des IGBT associés à des diodes de roue libre) disposés en trois bras. Chaque bras commande une phase du côté AC correspondant (rotor pour le RSC, réseau pour le GSC).

La commande des interrupteurs est réalisée par modulation de largeur d'impulsion (MLI ou PWM), qui génère une tension de sortie sinusoïdale à la fréquence et à l'amplitude désirées, à partir de la tension continue du bus DC. La tension de sortie d'un bras k d'un onduleur alimenté par une tension continue V_{dc} est :

$$V_k = S_k \cdot \frac{V_{dc}}{2} \quad \text{avec } S_k \in \{-1, +1\} \quad (2.43)$$

où S_k est la fonction de commutation du bras k . En pratique, la MLI sinusoïdale compare un signal de référence sinusoïdal à un signal triangulaire porteur de fréquence f_{dec} (typiquement 2 à 10 kHz) pour générer les impulsions de commande.

Du point de vue de la commande, les convertisseurs sont modélisés par leur valeur moyenne (modèle en valeur moyenne), qui ignore les harmoniques de commutation et ne retient que la composante fondamentale des tensions de sortie. Dans ce cadre, les tensions du RSC appliquées au rotor de la MADA sont directement les références de tension issues des régulateurs PI : V_{dr_ref} et V_{qr_ref} .

2.5.2 Modélisation du bus continu (filtre capacitif)

Le bus continu est constitué d'un condensateur de grande capacité C_{dc} connecté entre les deux convertisseurs RSC et GSC. Son rôle est double : il sert de réservoir d'énergie pour tamponner les écarts instantanés de puissance entre les deux côtés, et il permet de maintenir une tension continue stable V_{dc} , nécessaire au bon fonctionnement des deux onduleurs [7, 14].

L'équation régissant la dynamique de la tension du bus continu est obtenue par le bilan des puissances instantanées :

$$C_{dc} \cdot V_{dc} \cdot \frac{dV_{dc}}{dt} = P_{RSC} - P_{GSC} \quad (2.44)$$

où P_{RSC} est la puissance active transférée par le RSC côté DC (puissance rotorique extraite ou injectée) et P_{GSC} est la puissance active transférée par le GSC vers le réseau. En négligeant les pertes dans les interrupteurs et les inductances de filtrage, le bilan de puissance s'écrit :

$$P_{RSC} = \frac{3}{2} (V_{dr} \cdot I_{dr} + V_{qr} \cdot I_{qr}) \quad (2.45)$$

$$P_{GSC} = \frac{3}{2} \cdot (V_{dg} \cdot I_{dg} + V_{qg} \cdot I_{qg}) \quad (2.46)$$

où $V_{dg}, V_{qg}, I_{dg}, I_{qg}$ sont les composantes d-q des tensions et courants côté réseau du GSC. La dynamique du bus continu peut être reformulée en posant $W_{dc} = \frac{1}{2} C_{dc} V_{dc}^2$ (énergie stockée dans le condensateur) :

$$\frac{dW_{dc}}{dt} = P_{RSC} - P_{GSC} \quad (2.47)$$

Cette forme est linéaire et facilite la synthèse du régulateur de tension du bus continu. La tension V_{dc} est régulée par le régulateur externe du GSC, qui ajuste le courant actif I_{gd} pour maintenir V_{dc} à sa valeur de référence V_{dc_ref} [7, 14]. Le filtre inductif (inductance L_f , résistance R_f) placé entre le GSC et le réseau permet d'atténuer les harmoniques de commutation et d'assurer une connexion au réseau conforme aux normes. Les équations du filtre dans le repère d-q sont :

$$V_{dg} = R_f \cdot I_{dg} + L_f \cdot \frac{dI_{dg}}{dt} - W_s \cdot L_f \cdot I_{gq} + V_{sd} \quad (2.48)$$

$$V_{qg} = R_f \cdot I_{qg} + L_f \cdot \frac{dI_{qg}}{dt} + W_s \cdot L_f \cdot I_{dg} + V_{qs} \quad (2.49)$$

Ces équations constituent le modèle du GSC dans le repère d-q, utile pour la synthèse des régulateurs de courant du GSC [7, 14].

2.6 Commande de la MADA : stratégie MPPT et boucles de courant

La commande retenue pour la MADA est une **commande vectorielle par orientation du flux statorique**, structurée en deux niveaux : une boucle externe de génération des références issue de la stratégie MPPT, et des **boucles internes de régulation des courants rotoriques** I_{dr} et I_{qr} assurées par des **régulateurs Proportionnel-Intégral (PI)**. Le type de commande mis en œuvre est donc une **commande en courant** (et non en puissance), la régulation de la puissance étant obtenue indirectement à travers l'asservissement des courants rotoriques.

2.6.1 Orientation du flux statorique et découplage

En alignant l'axe d du repère de Park sur le vecteur flux statorique, on impose $\Phi_{sd} = \Phi_s$ et $\Phi_{sq} = 0$. La tension statorique se réduit à $V_{sq} = V_s = W_s \Phi_s$ et $V_{sd} = 0$. Les puissances active et réactive statoriques s'expriment alors directement en fonction des courants rotoriques :

$$P_s = -\frac{3}{2} \frac{M V_s}{L_s} I_{qr} \quad (2.50)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} \left(\frac{V_s^2}{W_s L_s} - \frac{M V_s}{L_s} I_{dr} \right) \quad (2.51)$$

Ces relations traduisent le **découplage** fondamental de la MADA : le courant rotorique en quadrature I_{qr} contrôle la puissance active (et donc le couple électromagnétique), tandis

que le courant rotorique direct I_{dr} contrôle la puissance réactive (et donc l'état magnétique de la machine).

2.6.2 Génération des références par la stratégie MPPT

La stratégie MPPT par asservissement de vitesse (section 2.3.1, équation 2.14) fournit la référence de couple T_{em}^* , équivalente à une référence de puissance active statorique P_{s_ref} . La référence de puissance réactive Q_{s_ref} est imposée selon l'objectif de gestion (facteur de puissance unitaire $Q_{s_ref} = 0$, ou soutien de tension du réseau). Les références de courant rotorique se déduisent alors de (2.50)–(2.51) :

$$I_{qr_ref} = -\frac{2}{3} \frac{L_s}{M V_s} P_{s_ref} \quad (2.52)$$

$$I_{dr_ref} = \frac{V_s}{W_s M} - \frac{2}{3} \frac{L_s}{M V_s} Q_{s_ref} \quad (2.53)$$

2.6.3 Boucles de courant et régulateurs PI

Chaque courant rotorique est asservi à sa référence par un régulateur PI. En reportant l'orientation du flux dans les équations rotoriques, les tensions de commande appliquées par le convertisseur côté rotor (RSC) s'écrivent :

$$V_{dr} = R_r I_{dr} + \sigma L_r \frac{dI_{dr}}{dt} - g W_s \sigma L_r I_{qr} \quad (2.54)$$

$$V_{qr} = R_r I_{qr} + \sigma L_r \frac{dI_{qr}}{dt} + g W_s \left(\sigma L_r I_{dr} + \frac{M V_s}{W_s L_s} \right) \quad (2.55)$$

où $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$ est le coefficient de dispersion et g le glissement. Les termes en $g W_s$ constituent les **termes de couplage** entre les axes d et q ; ils sont compensés par anticipation (*feed-forward*) afin de rendre les deux boucles indépendantes. Chaque régulateur, de fonction de transfert $C(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$, agit sur l'erreur de courant ($I_{dr_ref} - I_{dr}$ et $I_{qr_ref} - I_{qr}$) et délivre la tension rotorique de référence envoyée au RSC. Les gains K_p et K_i sont déterminés par compensation de la constante de temps électrique du rotor $\tau = \sigma L_r / R_r$, de manière à imposer une dynamique de boucle fermée du premier ordre, rapide et sans dépassement.

La figure 2.11 présente la structure générale de la commande vectorielle de la MADA.

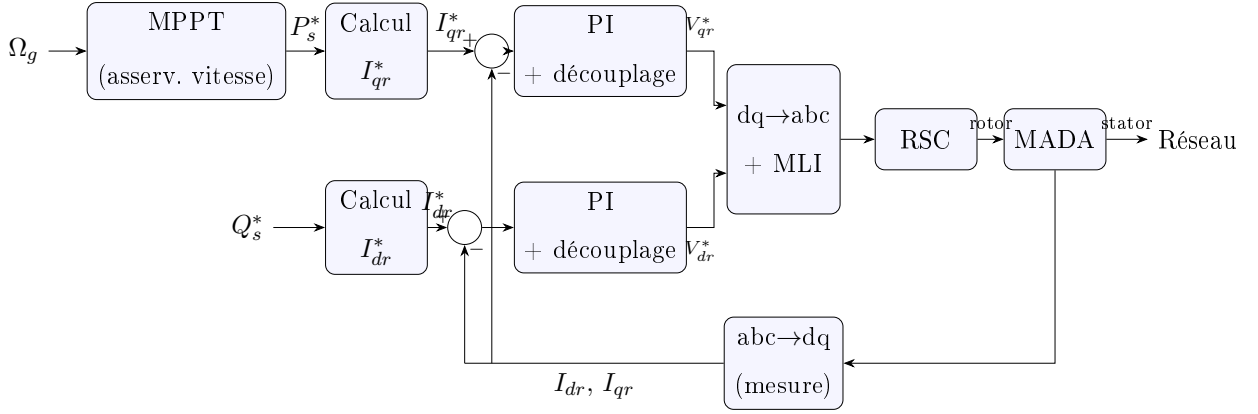


FIGURE 2.11 – Structure de la commande vectorielle de la MADA : stratégie MPPT et boucles de courant à régulateurs PI.

Le régulateur PI utilisé pour le réglage des puissances active et réactive offre plusieurs avantages, notamment la rapidité et la simplicité de mise en œuvre, ainsi que des performances acceptables pour la régulation du système considéré. Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes de conception des régulateurs PI ; dans ce travail, nous nous intéressons à la méthode basée sur la compensation de la constante de temps du régulateur avec celle du processus de la grandeur à réguler.

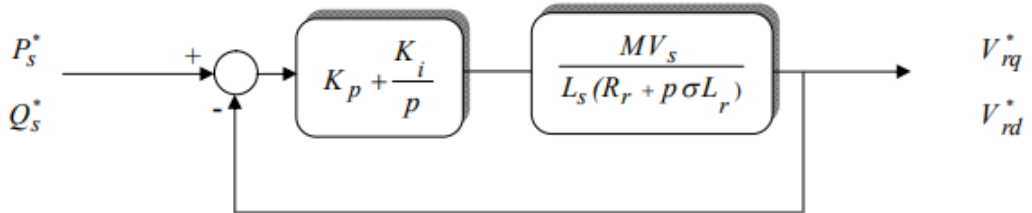


FIGURE 2.12 – Schéma de régulation des puissances P_s et Q_s . [19]

La figure 2.12 montre le système de réglage de chaque puissance au niveau du stator de la MADA, en boucle fermée par un régulateur PI. Dans ce cas, la fonction de transfert de chaque puissance est déduite du modèle de la MADA. La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) du système de régulation s'écrit :

$$\text{FTBO} = K_p \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{p} \cdot \frac{M V_s}{L_s (R_r + p \sigma L_r)} \quad (2.56)$$

La méthode de compensation des pôles consiste à éliminer le zéro de la fonction de transfert, ce qui conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_r}{\sigma L_r} \quad (2.57)$$

La compensation des pôles n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision, car les gains des régulateurs dépendent de ces paramètres. Après compensation, la FTBO devient :

$$\text{FTBO} = \frac{K_p M V_s}{L_s \sigma L_r p} \quad (2.58)$$

ce qui donne la fonction de transfert en boucle fermée suivante :

$$\text{FTBF} = \frac{1}{1 + \tau p} \quad (2.59)$$

avec :

$$\tau = \frac{L_s \sigma L_r}{K_p M V_s} \quad (2.60)$$

τ étant le temps de réponse du système, fixé préalablement. Dans ce cas, les gains du régulateur PI sont exprimés en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse comme suit :

$$\begin{cases} K_p = \frac{L_s \sigma L_r}{\tau M V_s} \\ K_i = \frac{R_r L_s}{\tau M V_s} \end{cases} \quad (2.61)$$

2.7 Conclusion

Ce chapitre a établi l'ensemble des modèles mathématiques nécessaires à la conception de la commande vectorielle de la MADA dans un système éolien. La modélisation a été conduite de manière progressive et rigoureuse, depuis la source primaire d'énergie jusqu'à l'interface avec le réseau électrique.

La première partie a établi le modèle aérodynamique de la turbine éolienne, en partant de la puissance cinétique disponible dans le vent ($P_{vent} = \frac{1}{2} \rho A v^3$) jusqu'à la puissance mécanique effectivement extraite ($P_{mec} = C_p P_{vent}$). La limite de Betz ($C_{p_max} = 16/27 \approx 0,593$) a été rappelée comme fondement théorique de l'aérodynamique des turbines. Le modèle analytique du coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$, la dynamique de l'arbre mécanique et la stratégie d'extraction de puissance maximale (MPPT) par asservissement de vitesse ont été présentés en détail [1, 6, 8–10, 15].

La deuxième partie a établi le modèle électrique de la MADA à deux niveaux de représentation. Dans le repère triphasé naturel (abc), les équations de tension et de flux font intervenir des inductances mutuelles variables, rendant le système non linéaire. La transfor-

mation de Park, appliquée avec une orientation du repère sur le flux statorique, a permis d'obtenir un modèle diphasé d-q à coefficients constants, dans lequel la puissance active est commandée par I_{rq} et la puissance réactive par I_{rd} . Ce découplage naturel est le fondement de la commande vectorielle indirecte [5, 7, 13].

La troisième partie a modélisé les convertisseurs statiques RSC et GSC en valeur moyenne, ainsi que la dynamique du bus continu capacitif. Ces modèles complètent la description de la chaîne de conversion de la MADA en vue de son implémentation et de sa simulation. L'ensemble de ces modèles sera implémenté sous MATLAB/Simulink, et les résultats de simulation seront analysés et commentés dans les chapitres suivants afin de valider les performances de la chaîne de conversion éolienne à base de MADA.

Chapitre 3

Modélisation et Commande de l'Onduleur NPC à Trois Niveaux dans la Chaîne Éolienne à MADA

3.1 Introduction

Dans une chaîne de conversion éolienne basée sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA), les convertisseurs statiques de puissance constituent l'interface indispensable entre le rotor de la machine et le réseau électrique. Ce sont eux qui permettent de découpler la fréquence de rotation de la turbine de la fréquence rigide du réseau, rendant possible le fonctionnement à vitesse variable et l'optimisation continue de l'extraction de puissance par MPPT. Sans ces convertisseurs, la MADA serait contrainte de fonctionner à vitesse fixe, perdant ainsi l'essentiel de son potentiel [5, 7].

Si l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux reste la solution la plus répandue, la qualité de l'énergie qu'il délivre se dégrade lorsque la puissance augmente, en raison d'un contenu harmonique élevé et de fortes contraintes en tension sur les interrupteurs. Pour y remédier, les **topologies multiniveaux** se sont imposées dans les applications de moyenne et grande puissance. Parmi elles, l'onduleur à trois niveaux de type **NPC (Neutral Point Clamped)** offre le meilleur compromis entre qualité de la tension de sortie, simplicité de commande et coût [17, 18].

Ce chapitre est entièrement consacré à cette topologie, qui est celle effectivement retenue dans la simulation du présent travail. Après un rappel des généralités sur les convertisseurs statiques et de la structure back-to-back de la MADA, on détaille la modélisation de l'onduleur NPC trois niveaux (structure d'un bras, états de commutation, niveaux de tension), puis la stratégie de commande par modulation de largeur d'impulsion à porteuses multiples. Le chapitre se termine par la présentation et l'interprétation des résultats de simulation obtenus sous MATLAB/Simulink, qui mettent en évidence la qualité de la tension générée et le faible taux de distorsion harmonique de la structure trois niveaux.

3.2 Généralités sur les convertisseurs statiques de puissance

3.2.1 Définition et classification

Un convertisseur statique est un dispositif qui transforme une énergie électrique d'une forme donnée en une autre, sans pièce mobile, au moyen d'interrupteurs à semi-conducteurs commandés. On distingue quatre grandes familles selon la nature des grandeurs traitées en entrée et en sortie : les redresseurs (AC/DC), les hacheurs (DC/DC), les onduleurs (DC/AC) et les convertisseurs directs alternatif-alternatif (AC/AC) tels que les cycloconvertisseurs et les convertisseurs matriciels [5, 7]. L'onduleur, objet de ce chapitre, convertit une tension

continue en une tension alternative dont l'amplitude, la fréquence et la phase sont contrôlables.

3.2.2 Rôle des onduleurs dans la chaîne de conversion à MADA

Dans un système éolien à MADA, les onduleurs assurent une triple fonction. D'abord, ils permettent le fonctionnement à vitesse variable en injectant dans le rotor une tension de fréquence de glissement $f_r = |g| f_s$, de sorte que le champ statorique reste synchrone avec le réseau à 50 Hz quelle que soit la vitesse mécanique de la turbine. Ensuite, ils réalisent la commande indépendante des puissances active et réactive en générant des tensions rotoriques parfaitement maîtrisées en amplitude, fréquence et phase. Enfin, ils garantissent la qualité de l'énergie injectée en limitant le contenu harmonique, condition de respect des codes de raccordement [7, 14].

Un avantage énergétique déterminant de la structure MADA est que les convertisseurs ne traitent qu'une **fraction de la puissance totale**, égale à la puissance de glissement $P_r = g P_s$. Pour une plage de vitesse de $\pm 30\%$ autour du synchronisme, le glissement maximal est $|g_{\max}| = 0,3$, de sorte que les convertisseurs ne dimensionnent qu'environ 30 % de la puissance nominale, ce qui réduit fortement leur coût et leurs pertes [5, 7, 14].

3.2.3 Structure back-to-back (RSC / GSC)

La topologie universellement adoptée pour les éoliennes à MADA est la structure dos-à-dos (*back-to-back*), constituée de deux onduleurs de tension couplés par un bus continu capacitif. Le convertisseur côté rotor (RSC : *Rotor Side Converter*) est connecté aux enroulements rotoriques via les bagues et balais ; il assure la commande vectorielle de la machine en générant les tensions rotoriques de référence V_{dr}^* et V_{qr}^* . Le convertisseur côté réseau (GSC : *Grid Side Converter*), relié au réseau par un filtre inductif, régule la tension du bus continu et peut participer au réglage de la puissance réactive côté réseau [7, 14].

La figure 3.1 présente la structure back-to-back de la chaîne de conversion de la MADA.

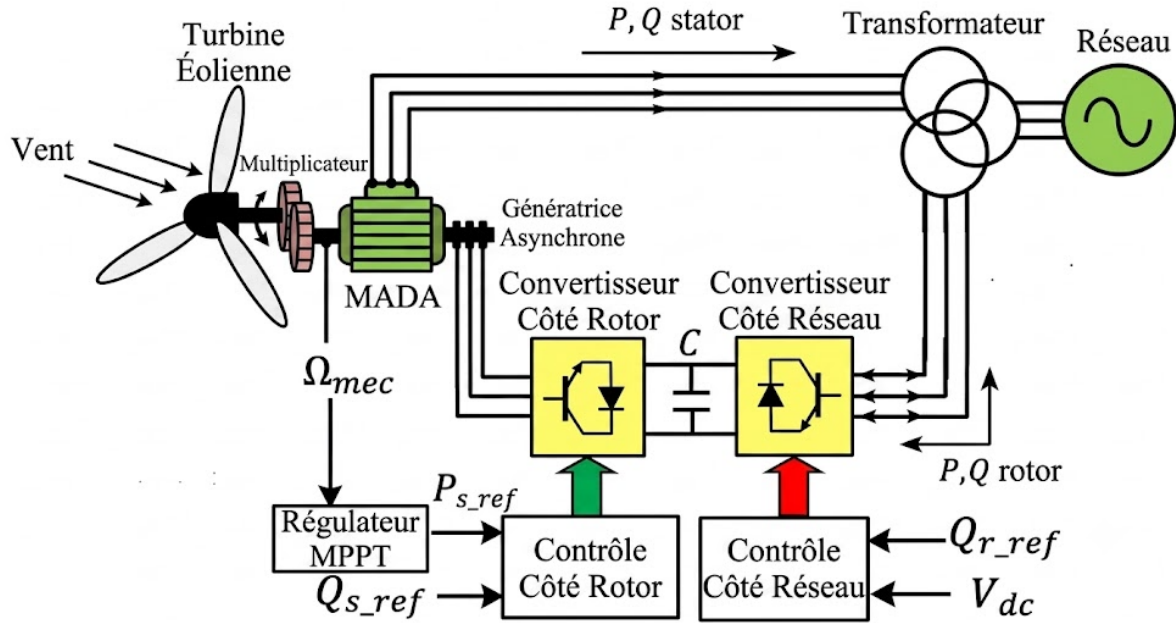


FIGURE 3.1 – Structure back-to-back de la chaîne de conversion de la MADA, avec les fonctions respectives du RSC et du GSC [5].

3.3 De l'onduleur deux niveaux à l'onduleur multiniveaux

3.3.1 Rappel de l'onduleur deux niveaux

L'onduleur de tension triphasé à deux niveaux (2L-VSI) est constitué de six interrupteurs IGBT, disposés en trois bras de deux interrupteurs complémentaires, chacun associé à une diode de roue libre. Pour un bras k , la tension de sortie par rapport au point milieu du bus s'écrit :

$$v_{kO} = (2S_k - 1) \frac{V_{dc}}{2}, \quad S_k \in \{0, 1\} \quad (3.1)$$

Chaque bras ne peut donc imposer que **deux niveaux** de tension ($+V_{dc}/2$ ou $-V_{dc}/2$), et l'onduleur ne dispose que de $2^3 = 8$ états de commutation, soit 6 vecteurs actifs et 2 vecteurs nuls. La tension de sortie est une succession d'impulsions de pleine amplitude, dont le filtrage exige une fréquence de découpage élevée et un filtre conséquent [5, 7].

3.3.2 Limites et intérêt des topologies multiniveaux

L'onduleur deux niveaux présente plusieurs limites lorsque la puissance croît : contenu harmonique élevé imposant un filtrage important, fortes contraintes en tension (dv/dt) sur les interrupteurs et sur les isolants de la machine, et pertes par commutation pénalisantes à fréquence de découpage élevée. Les onduleurs multiniveaux répondent à ces limites en

synthétisant la tension de sortie à partir de plusieurs niveaux intermédiaires : la forme d'onde se rapproche alors de la sinusoïde, le taux de distorsion harmonique chute, et la tension supportée par chaque interrupteur est réduite [18]. Parmi les topologies multiniveaux (NPC, *flying capacitor*, en cascade), la structure **NPC à trois niveaux** est la plus mature et la plus répandue dans les applications éoliennes de forte puissance ; c'est elle qui est adoptée dans ce travail.

3.4 Modélisation de l'onduleur NPC à trois niveaux

L'onduleur de tension est un convertisseur statique qui fournit, à partir d'une source de tension continue, une tension alternative d'amplitude et de fréquence réglables. Parmi les topologies d'onduleurs multiniveaux, on distingue trois familles principales : l'onduleur multiniveaux à cellules en cascade (ponts en « H »), l'onduleur à cellules imbriquées (condensateurs flottants) et l'onduleur à potentiels distribués NPC (*Neutral Point Clamped*). Chacune de ces topologies est adaptée à une application particulière. Les onduleurs multiniveaux génèrent une forme d'onde de sortie de meilleure qualité qu'un onduleur deux niveaux : ils limitent naturellement les surtensions, réduisent le contenu harmonique, améliorent le facteur de puissance et allègent le filtrage, ce qui permet d'obtenir une tension très proche de la sinusoïde. Dans ce travail, l'attention est portée sur l'analyse, la modélisation et la commande de l'onduleur de tension triphasé à trois niveaux de structure NPC, utilisé comme convertisseur côté rotor (RSC) de la MADA.

3.4.1 Structure de l'onduleur NPC à trois niveaux

L'onduleur triphasé à trois niveaux de structure NPC étudié comporte deux sources de tension continue et trois bras symétriques pourvus d'un point milieu. Chaque bras est constitué de quatre interrupteurs commandables (paires diode-IGBT, jouant le rôle d'interrupteurs bidirectionnels) et de deux diodes intermédiaires de clamp (DD_{k0} et DD_{k1}) qui assurent le niveau zéro de la tension de sortie.

La structure NPC utilise deux tensions d'entrée U_{C1} et U_{C2} et trois tensions de sortie V_a , V_b , V_c . Le point milieu, créé dans l'étage continu, est de valeur E telle que $U_{C1} + U_{C2} = E$, ce qui permet de générer des créneaux d'amplitude $-\frac{E}{2}$, 0 et $+\frac{E}{2}$. La combinaison de ces niveaux donne une onde plus proche de la sinusoïde qu'avec un onduleur deux niveaux classique. De plus, pour une tension d'entrée E , les interrupteurs d'un onduleur trois niveaux ne supportent que la moitié de la tension supportée par ceux d'un onduleur deux niveaux. La figure 3.2

présente la structure d'un onduleur trois niveaux.

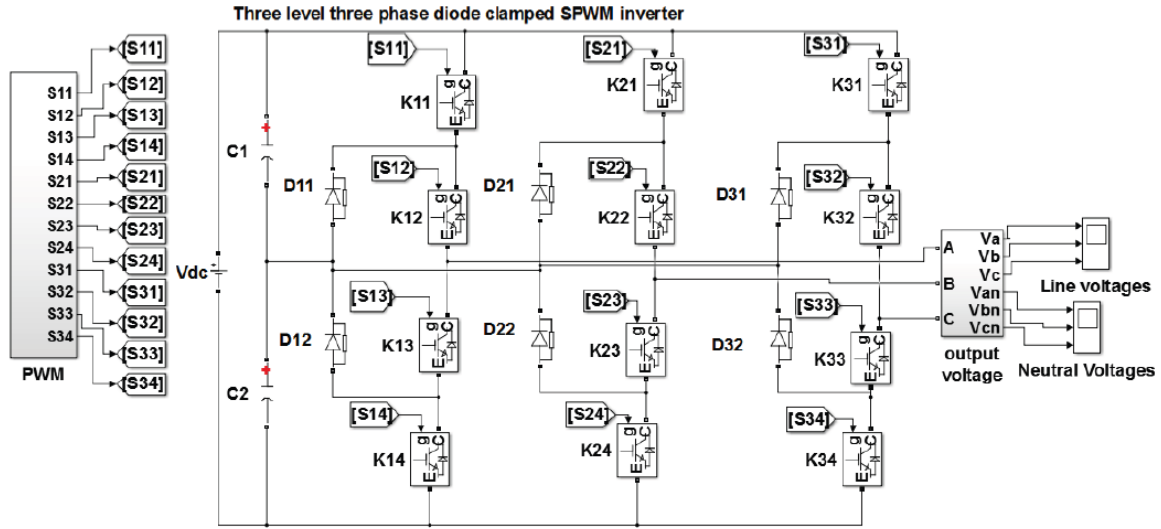


FIGURE 3.2 – Onduleur triphasé à trois niveaux de structure NPC [19].

D'une manière générale, un onduleur à N niveaux nécessite :

- $(N - 1) \cdot 2 \cdot 3$ interrupteurs commandables ;
- $(N - 1) \cdot 2 \cdot 3$ diodes en antiparallèle ;
- $(N - 1)(N - 2) \cdot 3$ diodes de clamp et $(N - 1)$ condensateurs.

La symétrie de l'onduleur triphasé permet de mener la modélisation bras par bras.

3.4.2 Modélisation d'un bras de l'onduleur

On définit d'abord un modèle global d'un bras, indépendamment de la commande, dont on déduit le modèle complet de l'onduleur. Les IGBT relient les deux sources lorsque la source de tension est génératrice et la source de courant réceptrice ; les diodes assurent la circulation du courant lorsque l'énergie est transférée de la sortie vers la source d'entrée. La structure d'un bras est représentée sur la figure 3.3.

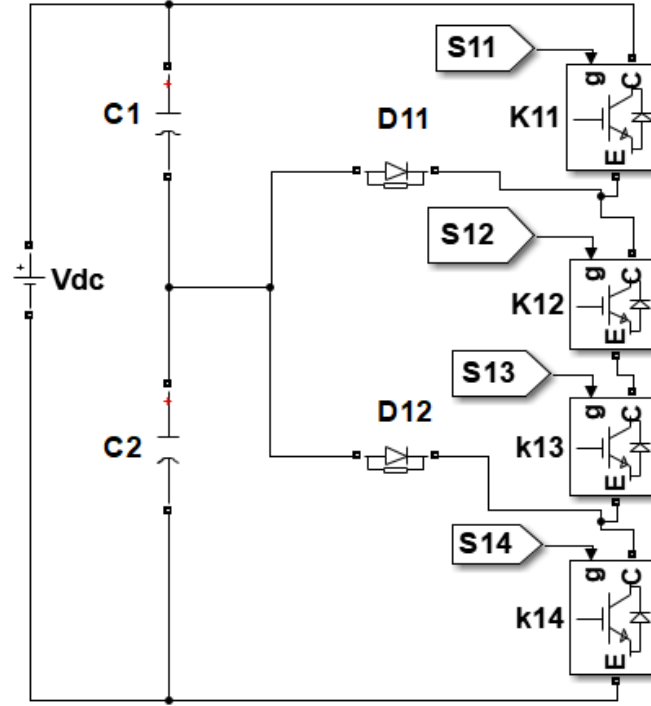


FIGURE 3.3 – Structure d'un bras de l'onduleur NPC à trois niveaux [19].

Chaque bras de l'onduleur NPC trois niveaux présente cinq configurations possibles, illustrées sur la figure 3.4.

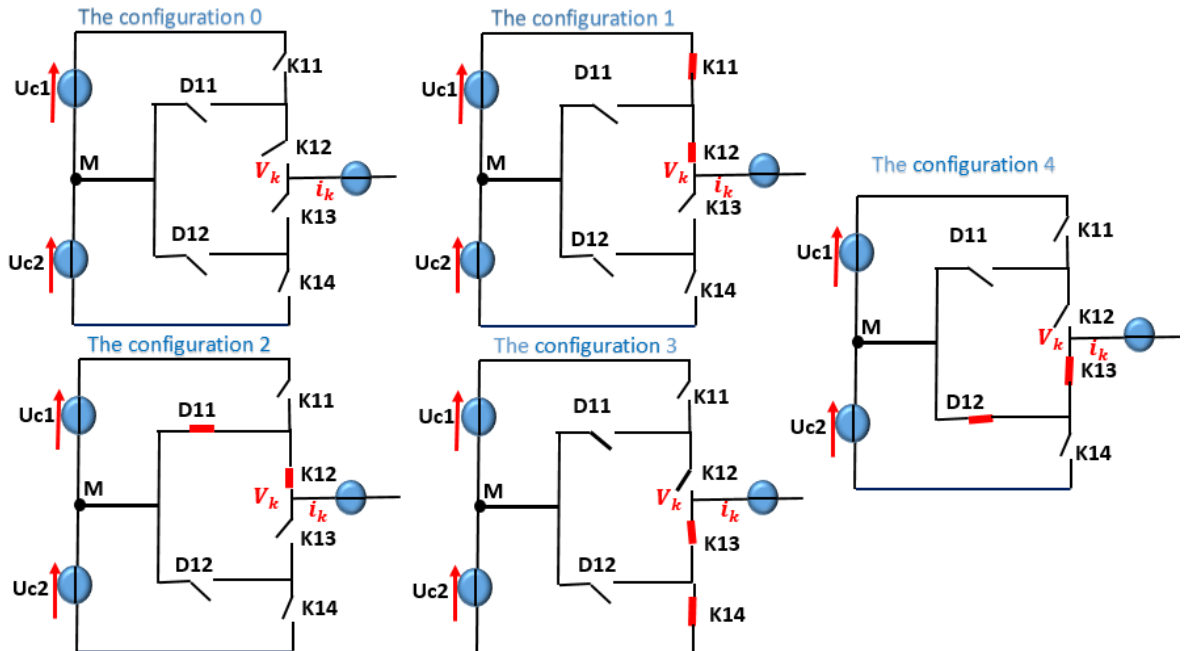


FIGURE 3.4 – Séquences de fonctionnement d'un bras de l'onduleur NPC à trois niveaux [19].

Ces configurations définissent les valeurs que peut prendre la tension simple V_{A0} entre la borne A de la charge et le point milieu O . Cette tension est entièrement définie par l'état (0 ou 1) des quatre interrupteurs K_{a1} , K_{a2} , K_{a3} , K_{a4} du bras. On pose $U_{C1} = U_{C2} = U_C$:

- **Configuration 0** – $(0, 0, 0, 0)$: les interrupteurs (K_{11}, K_{12}) et (K_{13}, K_{14}) sont bloqués ; la tension V_{A0} est imposée par la charge. Cette configuration est indésirable pour la commande.
- **Configuration 1** – $(1, 1, 0, 0)$: (K_{11}, K_{12}) passants, (K_{13}, K_{14}) bloqués ; $V_{A0} = U_{C1} = +\frac{E}{2}$.
- **Configuration 2** – $(0, 1, 0, 0)$: K_{12} passant, les autres bloqués ; $V_{A0} = 0$.
- **Configuration 3** – $(0, 0, 1, 1)$: (K_{13}, K_{14}) passants, (K_{11}, K_{12}) bloqués ; $V_{A0} = U_{C2} = -\frac{E}{2}$.
- **Configuration 4** – $(0, 0, 1, 0)$: K_{13} passant, les autres bloqués ; $V_{A0} = 0$.

3.4.3 Commande des configurations et fonctions de connexion

Le critère de commandabilité de l'onduleur trois niveaux impose que les transitions entre configurations reposent uniquement sur la commande externe et non sur les grandeurs électriques internes.

Commandes complémentaires. Les combinaisons $(0, 1, 1, 1)$ et $(1, 1, 1, 0)$ provoquent le court-circuit de l'une des deux demi-sources de tension continue ; elles sont donc interdites. Pour les éviter, on définit une commande complémentaire entre les interrupteurs d'un même bras. Trois choix sont possibles :

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{i1} = \overline{S_{i2}} \\ S_{i3} = \overline{S_{i4}} \end{array} \right. ; \quad \left\{ \begin{array}{l} S_{i1} = \overline{S_{i3}} \\ S_{i2} = \overline{S_{i4}} \end{array} \right. ; \quad \left\{ \begin{array}{l} S_{i1} = \overline{S_{i4}} \\ S_{i2} = \overline{S_{i3}} \end{array} \right. \quad (3.2)$$

où S_{ks} désigne le signal de commande du transistor K_s du bras k . Les tableaux 3.1, 3.2 et 3.3 donnent la tension V_{i0} obtenue pour chacune de ces trois commandes.

TABLEAU 3.1 – Commande complémentaire n° 1 : $S_{i1} = \overline{S_{i2}}$, $S_{i3} = \overline{S_{i4}}$.

S_{i1}	S_{i2}	S_{i3}	S_{i4}	V_{i0}
1	0	0	1	Non définie
1	0	1	0	$V_{i0} = 0$ ou $i_{ik} = 0$
0	1	0	1	$V_{i0} = 0$ ou $i_{ik} = 0$
0	1	1	0	$V_{i0} = 0$

TABLEAU 3.2 – Commande complémentaire n° 2 : $S_{i1} = \overline{S_{i3}}$, $S_{i2} = \overline{S_{i4}}$.

S_{i1}	S_{i2}	S_{i3}	S_{i4}	V_{i0}
0	0	1	1	$U_{C2} = -E/2$
1	0	1	0	Non définie
0	1	0	1	Non définie
1	1	0	0	$U_{C1} = +E/2$

TABLEAU 3.3 – Commande complémentaire n° 3 : $S_{i1} = \overline{S_{i4}}$, $S_{i2} = \overline{S_{i3}}$.

S_{i1}	S_{i2}	S_{i3}	S_{i4}	V_{i0}
0	0	1	1	$U_{C2} = -E/2$
1	0	0	1	Non définie
0	1	1	0	$V_k = 0$
1	1	0	0	$U_{C1} = +E/2$

Parmi ces commandes, celle qui permet d'obtenir les trois tensions U_{C1} , 0 et U_{C2} est la commande n° 3 : $S_{i1} = \overline{S_{i4}}$, $S_{i2} = \overline{S_{i3}}$.

Fonction de connexion des interrupteurs. La fonction de connexion F_{ij} décrit l'état ouvert ou fermé de l'interrupteur K_{ij} ; elle vaut 1 lorsque l'interrupteur est fermé et 0 sinon, avec $i = 1, 2, 3$ le numéro du bras et $j = 1, 2, 3, 4$ le numéro de l'interrupteur du bras :

$$F_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } K_{ij} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } K_{ij} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (3.3)$$

En adoptant la commande complémentaire n° 3, pour un bras i :

$$\begin{cases} S_{i1} = \overline{S_{i4}} \\ S_{i2} = \overline{S_{i3}} \end{cases} \implies \begin{cases} F_{i1} = 1 - F_{i4} \\ F_{i2} = 1 - F_{i3} \end{cases} \quad (3.4)$$

ce qui ramène chaque bras à deux cellules de commutation. Les trois relations correspondantes pour les trois bras s'écrivent :

$$\begin{cases} F_{11} = 1 - F_{14} \\ F_{12} = 1 - F_{13} \end{cases} ; \begin{cases} F_{21} = 1 - F_{24} \\ F_{22} = 1 - F_{23} \end{cases} ; \begin{cases} F_{31} = 1 - F_{34} \\ F_{32} = 1 - F_{33} \end{cases} \quad (3.5)$$

Fonctions de connexion des demi-bras. On définit la fonction de connexion du demi-bras F_{KM}^b , où K est le numéro du bras et $M = 1$ pour le demi-bras supérieur, $M = 0$ pour le demi-bras inférieur :

$$\begin{cases} F_{K1}^b = F_{K1} F_{K2} \\ F_{K0}^b = F_{K3} F_{K4} \end{cases} \quad (3.6)$$

F_{K1}^b est associée au demi-bras supérieur (paire K_1, K_2) et F_{K0}^b au demi-bras inférieur (paire K_3, K_4).

3.4.4 Fonctions de conversion

La fonction de conversion permet de passer des tensions d'entrée de l'onduleur à ses tensions de sortie. On note V_A, V_B, V_C les tensions simples aux bornes de chaque phase de la charge et V_{AM}, V_{BM}, V_{CM} les tensions de chaque phase de l'onduleur par rapport au point milieu M . Les potentiels des nœuds A, B, C par rapport à M s'expriment à l'aide des fonctions de connexion :

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11} F_{12} U_{C1} - F_{13} F_{14} U_{C2} \\ V_{BM} = F_{21} F_{22} U_{C1} - F_{23} F_{24} U_{C2} \\ V_{CM} = F_{31} F_{32} U_{C1} - F_{33} F_{34} U_{C2} \end{cases} \quad (3.7)$$

soit, à l'aide des fonctions de connexion des demi-bras :

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11}^b U_{C1} - F_{10}^b U_{C2} = (F_{11}^b - F_{10}^b) \frac{E}{2} \\ V_{BM} = F_{21}^b U_{C1} - F_{20}^b U_{C2} = (F_{21}^b - F_{20}^b) \frac{E}{2} \\ V_{CM} = F_{31}^b U_{C1} - F_{30}^b U_{C2} = (F_{31}^b - F_{30}^b) \frac{E}{2} \end{cases} \quad (3.8)$$

Les tensions composées s'en déduisent :

$$\begin{cases} U_{AB} = V_{AM} - V_{BM} \\ U_{BC} = V_{BM} - V_{CM} \\ U_{CA} = V_{CM} - V_{AM} \end{cases} \quad (3.9)$$

ce qui, sous forme matricielle et dans le cas $U_{C1} = U_{C2} = \frac{E}{2}$, donne :

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} \frac{E}{2} \quad (3.10)$$

3.4.5 Tensions simples de sortie

Pour une charge équilibrée couplée en étoile, de neutre N , les tensions simples s'écrivent $V_{AN} = V_A$, $V_{BN} = V_B$, $V_{CN} = V_C$. À partir du diagramme vectoriel des tensions (simples et composées) :

$$\begin{cases} V_A = \frac{U_{AB} - U_{CA}}{3} \\ V_B = \frac{U_{BC} - U_{AB}}{3} \\ V_C = \frac{U_{CA} - U_{BC}}{3} \end{cases} \quad (3.11)$$

soit, sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} \frac{E}{2} \quad (3.12)$$

3.4.6 Calcul des courants d'entrée

L'objectif est d'exprimer les courants des sources continues (I_{d1} , I_{d2} , I_{d0}) en fonction des courants de charge (I_A , I_B , I_C), à l'aide des fonctions de connexion des demi-bras :

$$\begin{cases} I_{d1} = F_{11}^b I_A + F_{21}^b I_B + F_{31}^b I_C \\ I_{d2} = F_{10}^b I_A + F_{20}^b I_B + F_{30}^b I_C \end{cases} \quad (3.13)$$

Le courant du point milieu se déduit de l'équation au nœud :

$$I_{d0} = I_A + I_B + I_C - I_{d1} - I_{d2} \quad (3.14)$$

ce qui conduit à la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} I_{d1} \\ I_{d2} \\ I_{d0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 1 - F_{11}^b - F_{10}^b & 1 - F_{21}^b - F_{20}^b & 1 - F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

3.4.7 Matrices de conversion

En regroupant les relations de tension (3.12) et de courant (3.15), et en choisissant le vecteur d'état $X = [U_{C1} \ U_{C2} \ i_1 \ i_2 \ i_3]^T$, on obtient la matrice de conversion simple $[N(t)]$, définie par :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ I_{d1} \\ I_{d2} \\ I_{d0} \end{bmatrix} = [N(t)] \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

avec :

$$[N(t)] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2F_{11}^b - F_{21}^b - F_{31}^b & -(2F_{10}^b - F_{20}^b - F_{30}^b) & 0 & 0 & 0 \\ 2F_{21}^b - F_{11}^b - F_{31}^b & -(2F_{20}^b - F_{10}^b - F_{30}^b) & 0 & 0 & 0 \\ 2F_{31}^b - F_{11}^b - F_{21}^b & -(2F_{30}^b - F_{10}^b - F_{20}^b) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3F_{11}^b & 3F_{21}^b & 3F_{31}^b \\ 0 & 0 & 3F_{10}^b & 3F_{20}^b & 3F_{30}^b \\ 0 & 0 & 3(1 - F_{11}^b - F_{10}^b) & 3(1 - F_{21}^b - F_{20}^b) & 3(1 - F_{31}^b - F_{30}^b) \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

De la même manière, en utilisant les tensions composées, on définit la matrice de conversion composée $[M(t)]$ par :

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \\ I_{d1} \\ I_{d2} \\ I_{d0} \end{bmatrix} = [M(t)] \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

avec :

$$[M(t)] = \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{21}^b & -(F_{10}^b - F_{20}^b) & 0 & 0 & 0 \\ F_{21}^b - F_{31}^b & -(F_{20}^b - F_{30}^b) & 0 & 0 & 0 \\ F_{31}^b - F_{11}^b & -(F_{30}^b - F_{10}^b) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ 0 & 0 & F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 0 & 0 & 1 - F_{11}^b - F_{10}^b & 1 - F_{21}^b - F_{20}^b & 1 - F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

3.5 Commande MLI de l'onduleur NPC à trois niveaux

Après avoir établi le modèle de l'onduleur NPC trois niveaux et les règles de génération de ses tensions et courants, on s'intéresse aux stratégies de commande. Aux basses fréquences, l'onduleur est commandé en pleine onde, le signal de commande étant à la même fréquence que la tension de sortie. Aux fréquences élevées, il est commandé par **modulation de largeur d'impulsion** (MLI), qui permet de régler à la fois l'amplitude et la fréquence tout en repoussant les harmoniques parasites. Plusieurs stratégies de MLI ont été proposées dans la littérature : MLI sinusoïdale (SPWM), modulations précalculées, commande par hystérésis de courant, MLI à une seule impulsion, à impulsions multiples, sinusoïdale, à bande d'hystérésis, etc.

3.5.1 Commande triangulo-sinusoïdale à deux porteuses

La commande triangulo-sinusoïdale compare deux porteuses triangulaires (ou en dents de scie) identiques, de fréquence f_c , décalées d'une demi-période l'une par rapport à l'autre, à trois tensions de référence sinusoïdales ($V_{ref1} = V_a$, $V_{ref2} = V_b$, $V_{ref3} = V_c$) de fréquence f_r . Cette technique est dite **MLI multiporteuse** (*multicarrier PWM*) à deux porteuses. Deux facteurs caractérisent cette modulation. Le coefficient de réglage en tension :

$$r = \frac{V_m}{V_{Pm}} \quad (3.20)$$

où V_m est l'amplitude de la référence et V_{Pm} celle de la porteuse, et l'indice de modulation m , rapport de la fréquence des porteuses à celle de la référence :

$$m = \frac{f_c}{f_r} \quad (3.21)$$

Les trois tensions de référence sinusoïdales sont :

$$\begin{cases} V_a = V_m \sin(2\pi ft) \\ V_b = V_m \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_c = V_m \sin\left(2\pi ft - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (3.22)$$

Les deux porteuses triangulaires bipolaires U_{P1} et U_{P2} , de période $T_P = 1/f_c$, sont décalées d'une demi-période. La largeur des impulsions est déterminée par les points d'intersection entre les modulantes et les porteuses. L'algorithme de la stratégie s'écrit :

$$\begin{cases} F_{i1} = 1 & \text{si } V_{refk}(t) \geq U_{P1} \\ F_{i2} = 1 & \text{si } V_{refk}(t) \geq U_{P2} \end{cases} \quad (3.23)$$

avec la commande complémentaire :

$$\begin{cases} F_{i1} = 1 - F_{i4} \\ F_{i2} = 1 - F_{i3} \end{cases} \quad (3.24)$$

La figure 3.5 présente le schéma de génération des signaux de commande MLI d'un bras de l'onduleur NPC trois niveaux, et la figure 3.6 illustre le principe de la technique triangulo-sinusoïdale à deux porteuses.

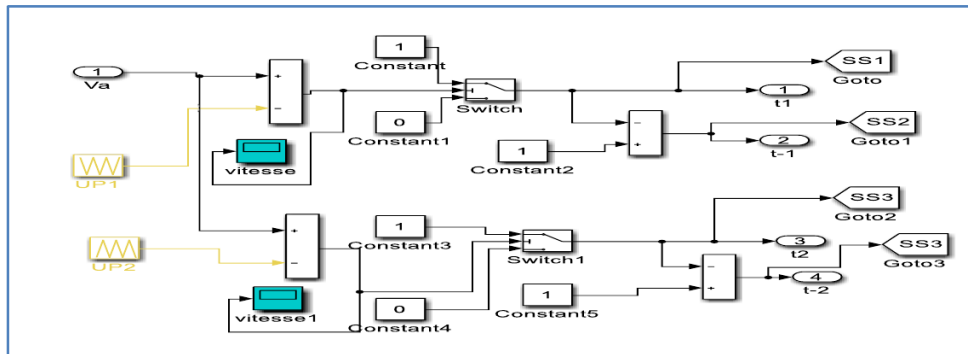


FIGURE 3.5 – Génération des signaux de commande MLI d'un bras de l'onduleur NPC trois niveaux. [19]

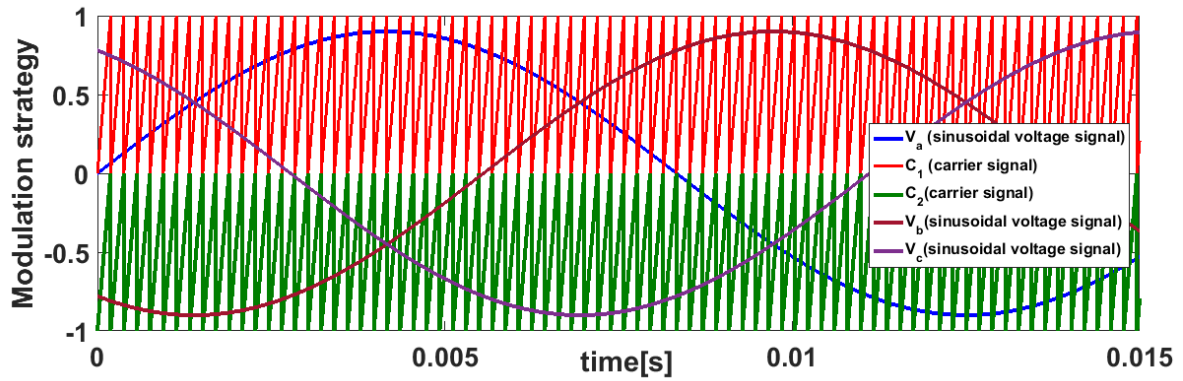


FIGURE 3.6 – Principe de la commande triangulo-sinusoïdale à deux porteuses [19].

3.6 Résultats de simulation de l'onduleur NPC trois niveaux

3.6.1 Conditions de simulation

L'onduleur NPC trois niveaux alimentant le rotor de la MADA a été implémenté sous MATLAB/Simulink. Les paramètres de l'onduleur et de la machine utilisés sont rassemblés dans le tableau 3.4.

TABEAU 3.4 – Paramètres de simulation.

Grandeur	Symbole	Valeur
Tension du bus continu	V_{dc}	600 V
Fréquence des porteuses	f_p	600 Hz
Indice de modulation de fréquence	m_f	12
Tension simple statorique	V_s	220 V
Fréquence réseau	f	50 Hz
Nombre de paires de pôles	p	2
Résistance statorique	R_s	1,2 Ω
Résistance rotorique	R_r	1,8 Ω
Inductance statorique	L_s	0,1554 H
Inductance rotorique	L_r	0,1568 H
Inductance mutuelle	M	0,15 H
Inertie	J	0,2 kg m ²
Coefficient de frottement	f_r	0,001

3.6.2 Signaux de commande MLI

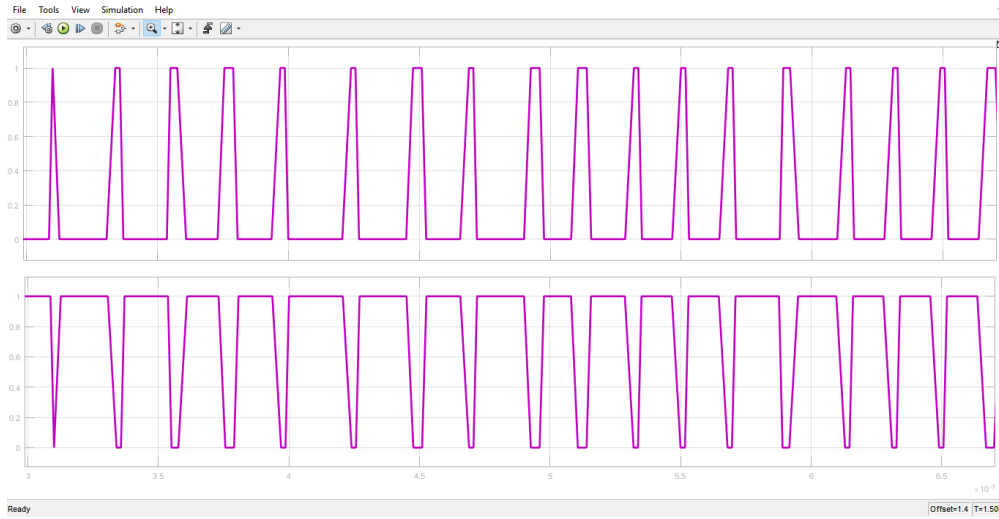


FIGURE 3.7 – Modulante sinusoïdale et porteuses triangulaires (zoom sur 1–2 périodes), et impulsions de commande d'un bras.

La figure 3.7 illustre le principe de la MLI à deux porteuses : la modulante issue de la commande vectorielle est comparée aux deux porteuses triangulaires à 600 Hz, générant les impulsions qui pilotent les quatre interrupteurs de chaque bras selon la logique de commande (3.23).

3.6.3 Analyse harmonique et taux de distorsion

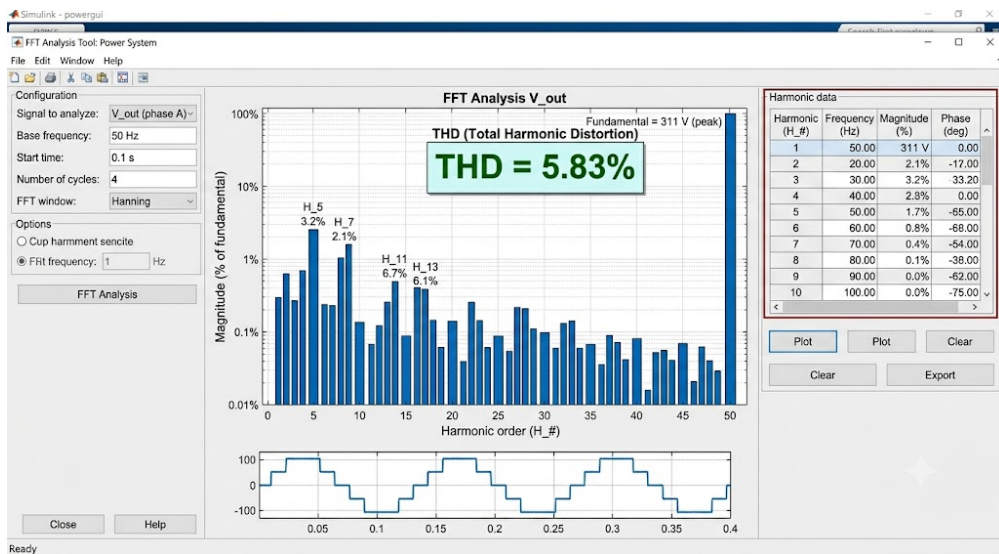


FIGURE 3.8 – Spectre harmonique de la tension de sortie et valeur du THD (outil FFT de powergui).

L'analyse spectrale confirme la concentration des harmoniques autour de l'indice $m_f = 12$ et de ses multiples. Le taux de distorsion harmonique mesuré pour la tension de sortie est

de **5,83 %** (figure 3.8).

Les résultats obtenus confirment les développements théoriques. La structure NPC trois niveaux génère une tension simple à trois niveaux, dont le contenu harmonique réduit allège les contraintes de filtrage et limite les pertes harmoniques dans la MADA. La commande MLI à porteuses multiples assure une fondamentale propre à 50 Hz tout en maintenant une fréquence de découpage modérée ($f_p = 600$ Hz), ce qui réduit les pertes par commutation. Ces caractéristiques font de l'onduleur NPC trois niveaux une solution particulièrement adaptée à l'alimentation rotorique de la MADA dans une chaîne éolienne.

3.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté l'étude complète de l'onduleur retenu dans ce travail : l'onduleur de tension NPC à trois niveaux. Après avoir situé le rôle des convertisseurs dans la structure back-to-back de la MADA et rappelé les limites de l'onduleur deux niveaux, la topologie NPC a été modélisée en détail : structure d'un bras à quatre interrupteurs et deux diodes de clamp, cinq configurations de commutation conduisant à une tension simple à trois niveaux et à une tension composée à cinq niveaux, puis mise en équations à l'aide des fonctions de connexion et de conversion (matrices $[N(t)]$ et $[M(t)]$).

La stratégie de commande par MLI à porteuses multiples a ensuite été développée, avec sa logique de comparaison à deux porteuses et ses indices de modulation. Enfin, les résultats de simulation ont validé le comportement attendu de la structure : forme d'onde multiniveaux et taux de distorsion harmonique réduit, garants d'une bonne qualité de l'énergie injectée.

Le modèle de l'onduleur ainsi établi constitue le maillon entre le modèle de la MADA (chapitre 2) et l'étude du comportement global de la chaîne de conversion éolienne, dont les résultats de simulation sont présentés et interprétés au chapitre suivant.

Chapitre 4

Résultats de simulation et Interprétation

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons et analysons les résultats de simulation de la stratégie de commande appliquée à la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) intégrée dans un système de production éolien. Les simulations ont été effectuées sous l'environnement MATLAB/Simulink pour une durée totale de 1,5 s. L'objectif est d'évaluer le comportement dynamique de la MADA (stator et rotor) face à des variations brusques de consignes appliquées à des instants précis ($t = 0,4\text{ s}$, $t = 0,9\text{ s}$ et $t = 1,2\text{ s}$).

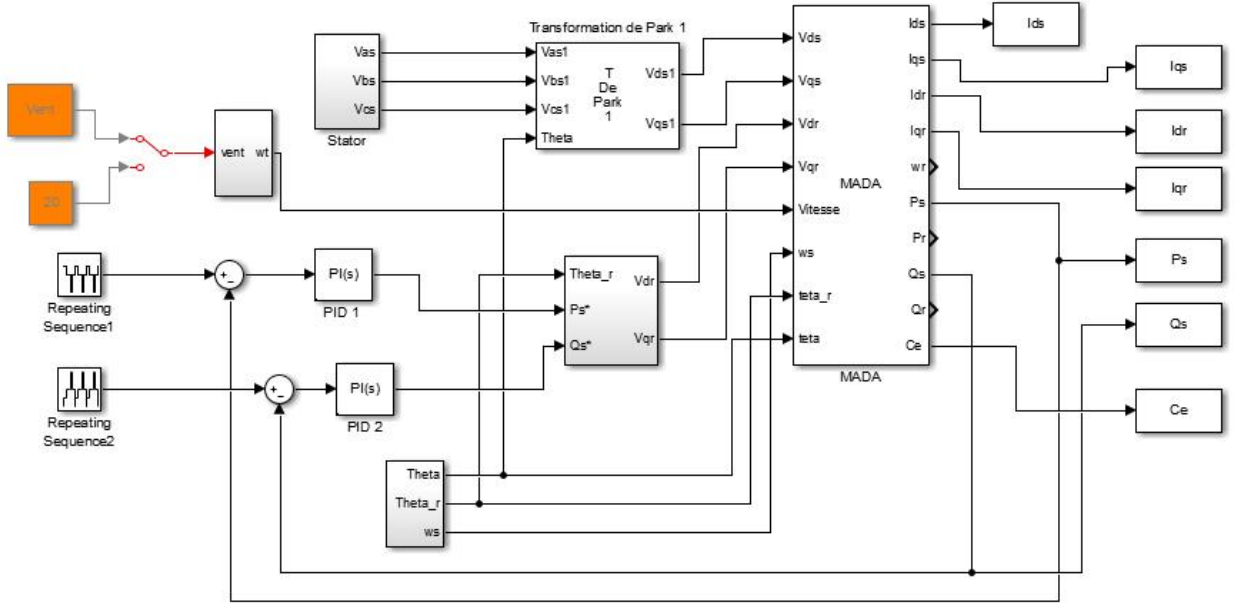


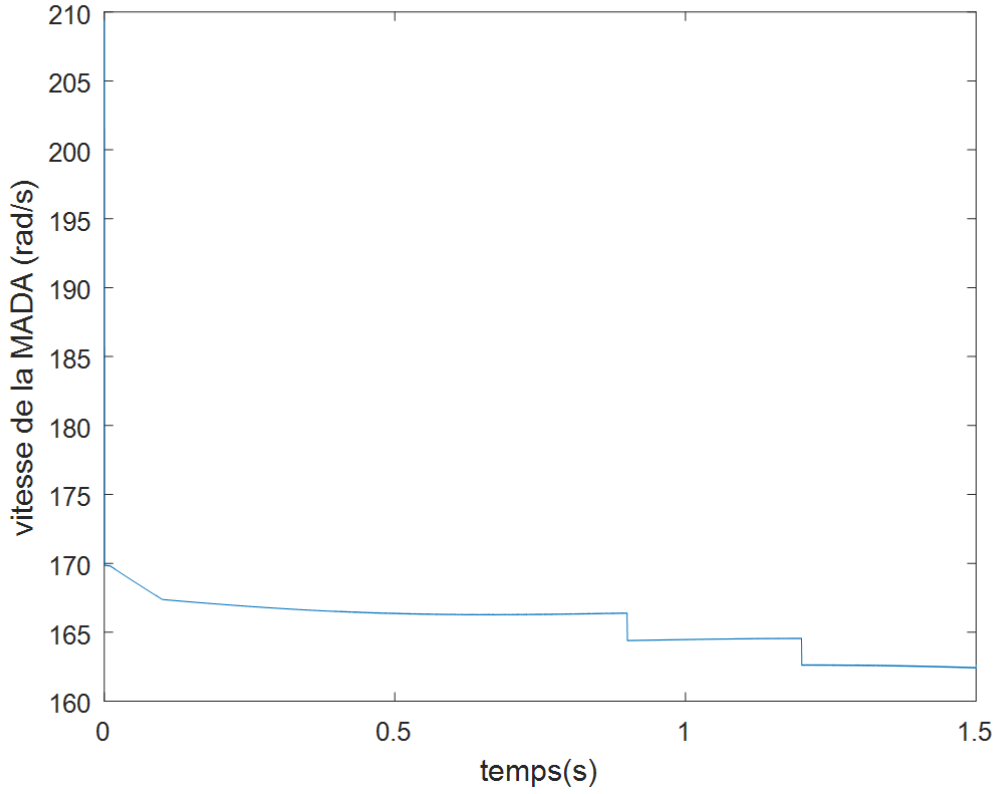
FIGURE 4.1 – Schéma de simulation global de la chaîne de conversion éolienne sous MATLAB/Simulink.

La figure 4.1 présente le schéma bloc global implémenté sous MATLAB/Simulink pour la simulation de l'ensemble du système. Ce schéma intègre la turbine éolienne avec sa commande MPPT, la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans le repère de Park, l'onduleur NPC à trois niveaux modélisé avec sa commande MLI à deux porteuses, ainsi que l'ensemble des boucles de régulation de courant et de puissance. Les blocs de visualisation (scopes) et de sauvegarde (to workspace) permettent d'analyser le comportement temporel et harmonique de la chaîne de conversion lors des différentes phases de fonctionnement.

4.2 Comportement Mécanique de la MADA

4.2.1 Vitesse de rotation de la MADA (Ω_T)

La figure 4.2 présente l'évolution de la vitesse de rotation de la MADA.

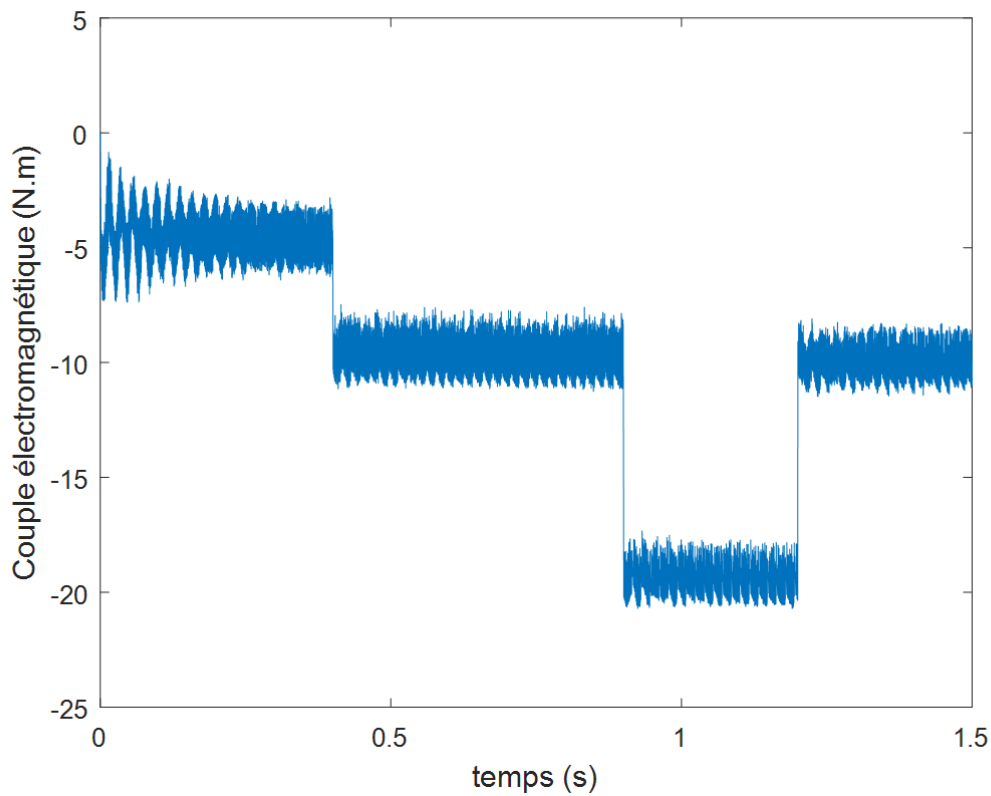

 FIGURE 4.2 – Vitesse de rotation de la MADA (Ω_T).

Observation : Au démarrage (0 à 0,1s), la vitesse part d'environ 170 rad/s puis décroît rapidement durant le régime transitoire. Elle se stabilise ensuite autour de 166 rad/s, avant de diminuer par paliers successifs lors des accroissements de charge : environ 164,5 rad/s à $t = 0,9$ s, puis 162,5 rad/s à $t = 1,2$ s. La plage de vitesse (de l'ordre de 160 à 170 rad/s) demeure supérieure à la vitesse de synchronisme ($W_s = W_s/p \approx 157$ rad/s), ce qui traduit un fonctionnement en mode hypersynchrone.

Interprétation : La décroissance de la vitesse par paliers accompagne l'augmentation de la puissance active générée, et donc du couple électromagnétique résistant qui s'oppose à l'entraînement mécanique de la turbine. Chaque échelon de consigne conduit la machine vers un nouveau point d'équilibre mécanique. Le maintien d'une vitesse supérieure au synchronisme confirme que la MADA fonctionne en régime hypersynchrone, échangeant de la puissance avec le réseau à la fois par le stator et par le rotor.

4.2.2 Couple Électromagnétique (C_e)

La figure 4.3 présente l'évolution du couple électromagnétique.

FIGURE 4.3 – Couple électromagnétique (C_e).

Observation : La courbe montre de fortes oscillations transitoires au démarrage dues à la magnétisation de la MADA. Une fois le régime permanent établi, le couple répond quasi instantanément aux échelons de consigne :

- De 0 à 0,4s : stabilisation autour de -5 N.m.
- À $t = 0,4$ s : le couple descend à environ -10 N.m.
- À $t = 0,9$ s : il subit une forte baisse pour atteindre environ -20 N.m.
- À $t = 1,2$ s : il remonte pour se stabiliser de nouveau autour de -10 N.m.

Interprétation : Le signe négatif du couple confirme que la MADA fonctionne en régime générateur (le couple électromagnétique s'oppose au sens de rotation imposé par la turbine pour convertir l'énergie mécanique). La forme en paliers est homothétique à celle de la puissance active statorique P_s , ce qui est cohérent avec le contrôle du couple par l'axe en quadrature. L'épaisseur de la courbe met en évidence les ondulations de couple (*chattering*), phénomène classique provoqué par les commutations à haute fréquence de l'onduleur de tension alimentant le rotor.

4.3 Analyse des Puissances de la MADA

Le principe de la MADA repose sur le partage des puissances : le stator est directement lié au réseau, tandis que le rotor est contrôlé via des convertisseurs statiques.

4.3.1 Puissance Active Statorique (P_s)

La figure 4.4 présente l'évolution de la puissance active statorique.

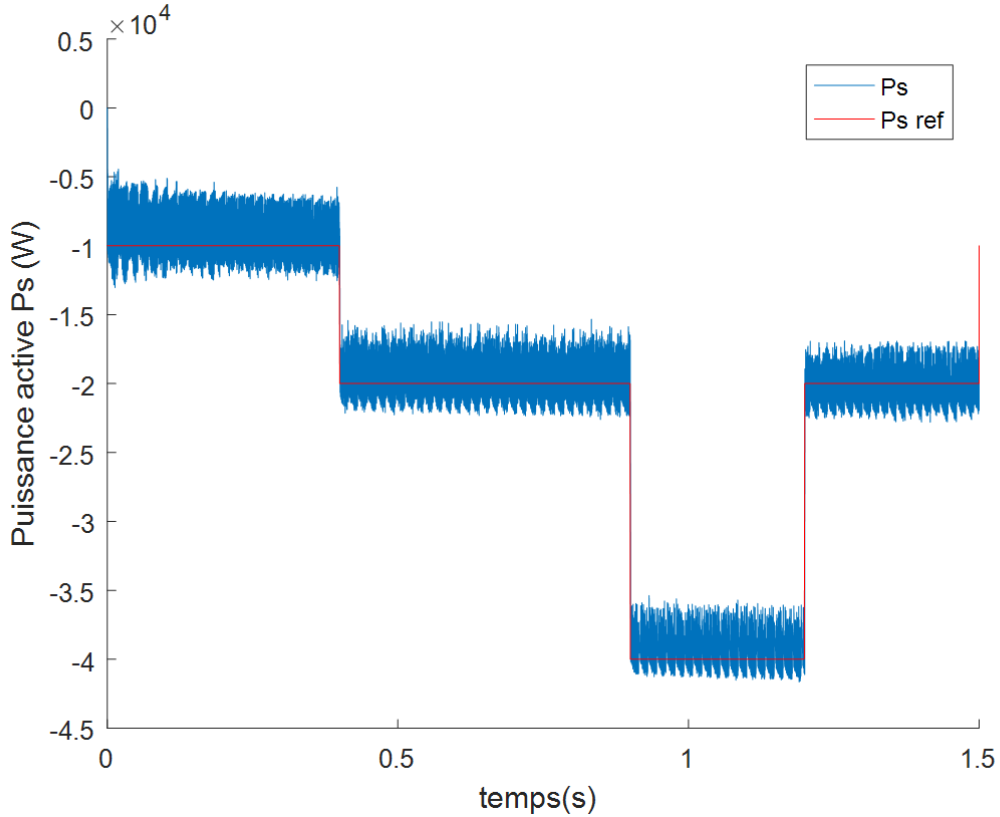


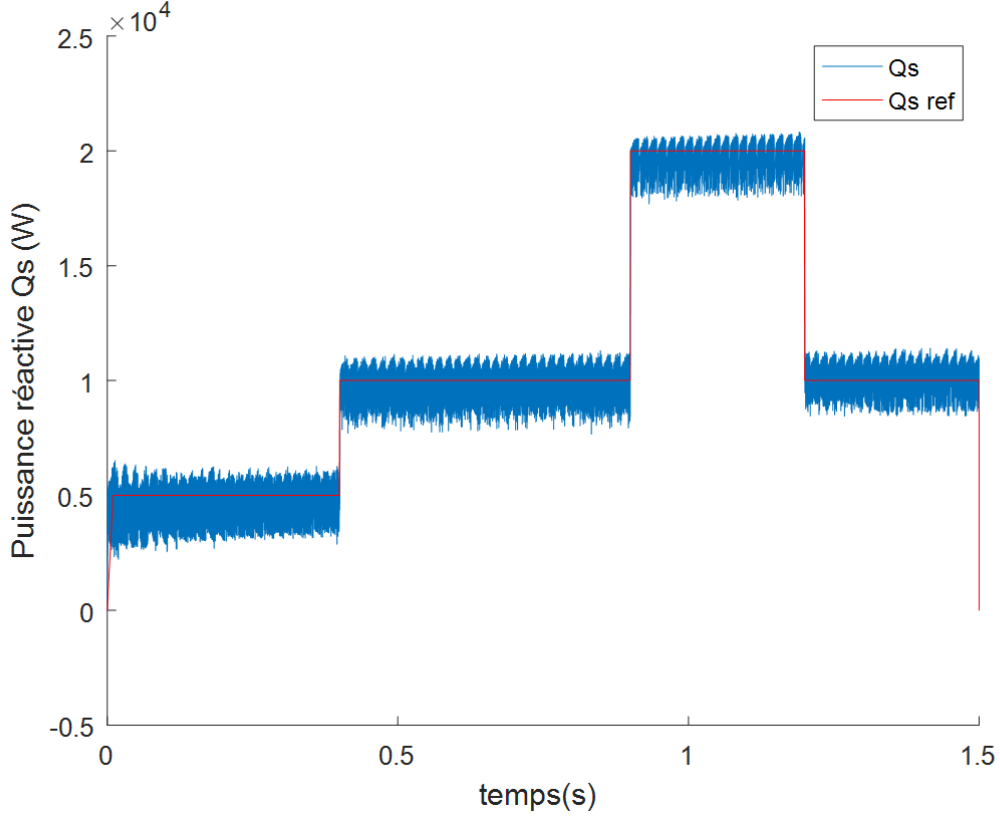
FIGURE 4.4 – Puissance active statorique (P_s).

Observation : La puissance active statorique présente une forme strictement identique (homothétique) à celle du couple électromagnétique. Elle évolue par paliers négatifs successifs : -10 kW, -20 kW, pour atteindre une puissance maximale de -40 kW entre 0,9 s et 1,2 s.

Interprétation : Le signe négatif de P_s montre que la puissance active est générée par le stator et injectée vers le réseau électrique. La rapidité de transition entre les paliers prouve la haute performance dynamique de la commande appliquée.

4.3.2 Puissance Réactive Statorique (Q_s)

La figure 4.5 présente l'évolution de la puissance réactive statorique.

FIGURE 4.5 – Puissance réactive statorique (Q_s).

Observation : La courbe de Q_s suit fidèlement sa consigne ($Q_s \text{ ref}$) et augmente par échelons positifs : 5 kVAR de 0 à 0,4 s, 10 kVAR de 0,4 à 0,9 s, 20 kVAR de 0,9 à 1,2 s, puis de nouveau 10 kVAR au-delà de 1,2 s.

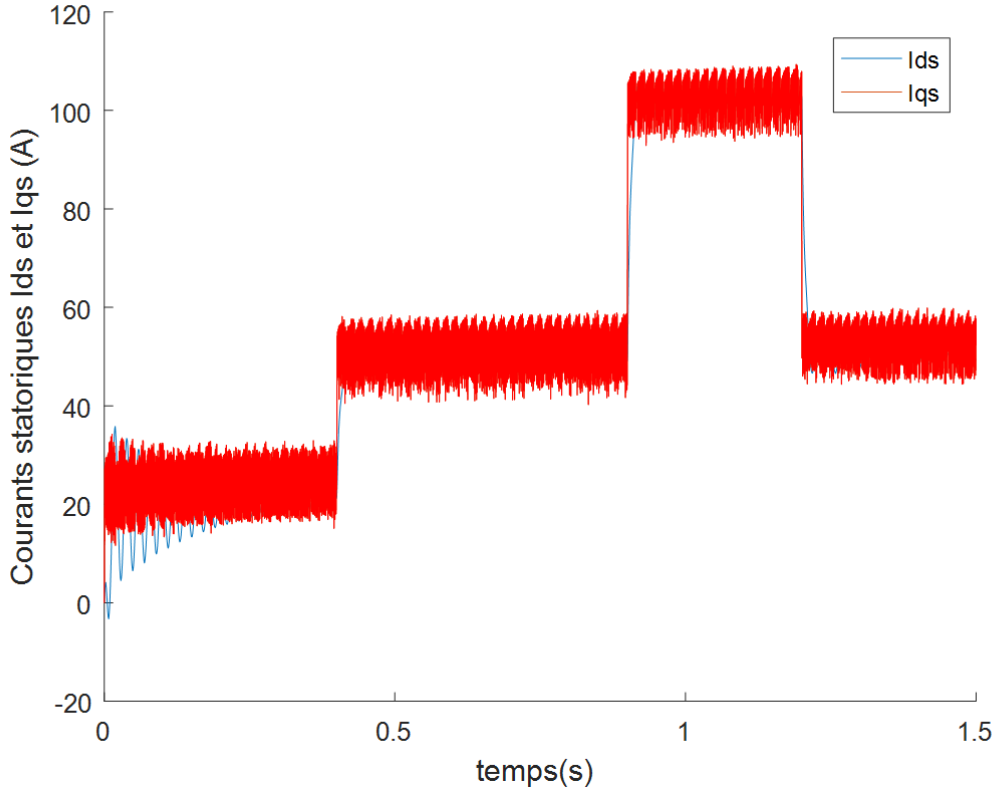
Interprétation : Le signe positif de Q_s indique que le stator de la MADA absorbe de la puissance réactive pour créer et maintenir son flux magnétique. Le suivi précis de la consigne, indépendamment des variations de la puissance active P_s , illustre le découplage assuré par la commande vectorielle entre les puissances active et réactive.

4.4 Analyse des Courants Statoriques et Rotoriques (Découplage)

Le but de la commande vectorielle par orientation du flux statorique est de séparer le contrôle du flux et du couple à travers les composantes directe (d) et en quadrature (q) des courants. Les courants sont ici regroupés par enroulement : d'abord les composantes statoriques (I_{ds} , I_{qs}), puis les composantes rotoriques (I_{dr} , I_{qr}).

4.4.1 Courants statoriques (I_{ds} et I_{qs})

La figure 4.6 présente l'évolution des courants statoriques I_{ds} et I_{qs} .

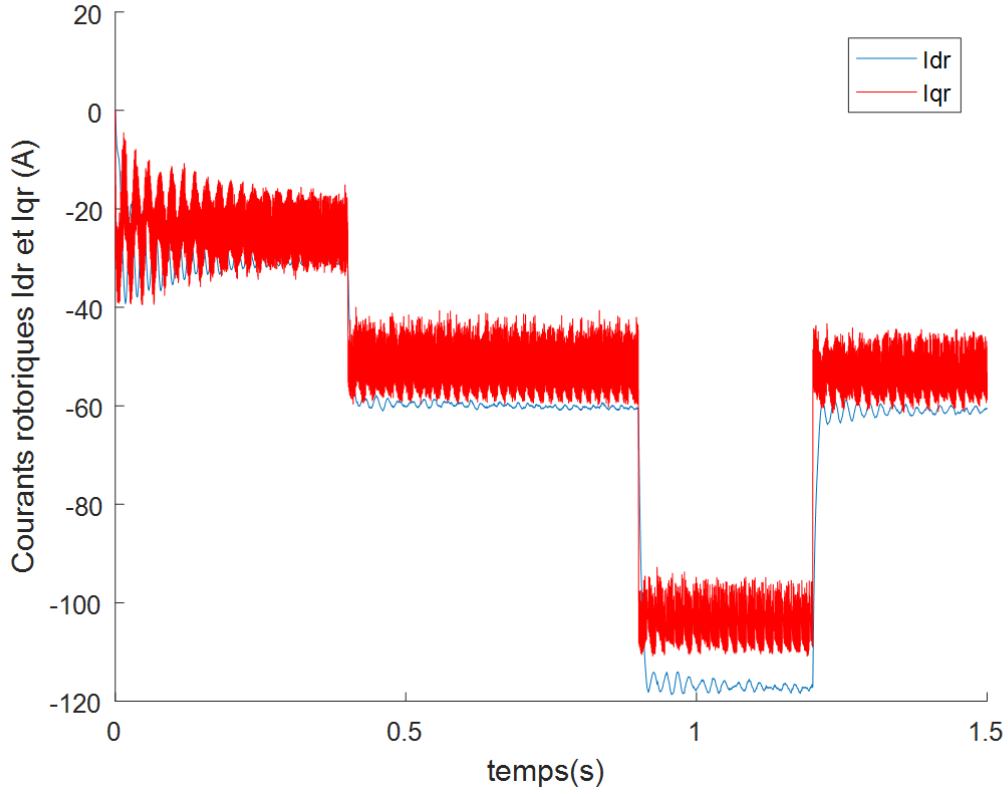
FIGURE 4.6 – Courants statoriques I_{ds} et I_{qs} .

Observation : Après le transitoire de démarrage, les deux composantes statoriques sont positives et évoluent par paliers en suivant les consignes de puissance : environ 25–30 A de 0 à 0,4 s, près de 55 A de 0,4 à 0,9 s, jusqu’à environ 105 A de 0,9 à 1,2 s, puis un retour autour de 50 A au-delà de 1,2 s.

Interprétation : La composante en quadrature I_{qs} reproduit les variations du couple C_e et de la puissance active P_s , tandis que la composante directe I_{ds} accompagne celles de la puissance réactive Q_s . La stabilité de chaque composante lors des transitions imposées à l’autre illustre le découplage effectif réalisé par la commande vectorielle.

4.4.2 Courants rotoriques (I_{dr} et I_{qr})

La figure 4.7 présente l’évolution des courants rotoriques I_{dr} et I_{qr} .

FIGURE 4.7 – Courants rotoriques I_{dr} et I_{qr} .

Observation : Les courants rotoriques présentent une dynamique analogue à celle des courants statoriques mais de signe opposé (négatif) : environ -25 A de 0 à 0,4s, -55 A de 0,4 à 0,9s, jusqu'à environ -110 A de 0,9 à 1,2s, puis un retour vers -55 A au-delà de 1,2s.

Interprétation : Ce sont les courants rotoriques, imposés par les convertisseurs, qui pilotent réellement la machine : la composante I_{qr} règle le couple et la puissance active, la composante I_{dr} règle le flux et la puissance réactive. Leur signe opposé à celui des courants statoriques traduit l'échange d'énergie à travers la structure back-to-back, le rotor ne traitant qu'environ 30 % de la puissance nominale. Le suivi fidèle des consignes confirme la robustesse et le bon découplage de la commande vectorielle de la MADA.

4.5 Conclusion

L'analyse des résultats de simulation confirme la robustesse de la commande de la MADA. La machine répond aux exigences du système éolien avec un temps de réponse rapide, un suivi de consigne précis et un découplage efficace des puissances active et réactive via les axes d et q . Les ondulations observées restent dans les limites tolérables de l'association machine-convertisseur.

Conclusion générale

Ce mémoire a proposé une étude et une implémentation numérique d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA) associée à un onduleur NPC à trois niveaux. À travers la modélisation aérodynamique de la turbine, la formulation du modèle électrique de la MADA dans le repère d-q, et la synthèse d'une commande vectorielle réconciliée, l'étude met en évidence la capacité du système à :

- extraire et réguler efficacement la puissance mécanique issue du vent grâce à une stratégie MPPT robuste ;
- contrôler de manière découplée les puissances active et réactive via la commande vectorielle, assurant une régulation fine et une réponse dynamique satisfaisante ;
- améliorer la qualité de la tension rotorique et réduire le contenu harmonique en recourant à un onduleur NPC trois niveaux commandé par MLI à porteuses multiples.

Les validations numériques obtenues sous MATLAB/Simulink montrent une nette amélioration de la qualité de forme d'onde (THD réduit). Toutefois, certaines limites ont été identifiées : hypothèses simplificatrices dans les modèles (p. ex. pertes et non-linéarités simplifiées).

Pour poursuivre et consolider ce travail, plusieurs pistes de recherche sont recommandées :

- étendre la validation expérimentale sur un banc physique représentatif afin de vérifier les performances en conditions réelles ;
- intégrer des lois de commande robustes ou adaptatives (H_∞ , commande prédictive) pour accroître la tolérance aux variations paramétriques et aux défauts ;
- optimiser la stratégie de modulation pour réduire davantage les pertes de commutation et l'équilibrage du point milieu dans la topologie NPC ;
- étudier l'intégration du système dans un contexte de micro-réseau contenant des sources renouvelables multiples et des dispositifs de stockage pour évaluer l'impact sur la stabilité et la gestion de l'énergie.

En conclusion, ce mémoire fournit une base conceptuelle et algorithmique solide pour l'utilisation des MADA alimentées par onduleurs NPC trois niveaux dans les chaînes de conversion éolienne, tout en offrant des axes clairs pour des travaux futurs visant à améliorer la robustesse, l'efficacité et l'intégration au réseau.

Bibliographie

- [1] S. Heier, *Grid Integration of Wind Energy*, 3rd ed., Wiley, 2014.
- [2] Global Wind Energy Council, *Global Wind Report*, rapport annuel.
- [3] R. Rouabhi, *Étude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation – Application à l'énergie éolienne*, Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas Sétif, 2012.
- [4] B. Kelkoul, *Étude et commande d'une turbine éolienne utilisant une machine asynchrone à double alimentation*, Mémoire de Magister, Université de Technologie de Tlemcen, 2011.
- [5] B. Beltran, T. Ahmed-Ali, M. E. H. Benbouzid, "High-Order Sliding Mode Control of a DFIG-Based Wind Turbine for Power Maximization and Grid Fault Tolerance", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 26, no. 1, pp. 224-232, 2011.
- [6] B. Wu, Y. Lang, N. Zargari, S. Kouro, *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*, IEEE Press / Wiley, 2011.
- [7] G. Segulier, F. Labrique, *Electronique de Puissance*, 8e edition, Dunod, Paris, 2011.
- [8] E. Hau, *Wind Turbines : Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, 2nd ed., Springer, 2013.
- [9] R. Pena, J. C. Clare, G. M. Asher, "Doubly Fed Induction Generator Using Back-to-Back PWM Converters and its Application to Variable-Speed Wind-Energy Generation", *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, vol. 143, no. 3, pp. 231-241, 1996.
- [10] F. Poirier, T. Bouaouiche, M. Machmoum, "Advanced control of a doubly-fed induction generator for wind energy conversion", *Electric Power Systems Research*, Elsevier, vol. 79, no. 7, pp. 1085-1096, 2009.
- [11] Article scientifique, *Maximum Power Point Tracking Strategies for Wind Energy Conversion Systems*, revue internationale en électronique de puissance.
- [12] L. Xu, P. Cartwright, "Direct Active and Reactive Power Control of DFIG for Wind Energy Generation", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 21, no. 3, pp. 750-758, 2006.
- [13] A. Tapia, G. Tapia, J. X. Ostolaza, J. R. Saenz, "Modeling and Control of a Wind Turbine Driven Doubly Fed Induction Generator", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 18, no. 2, pp. 194-204, 2003.

- [14] R. Cardenas, R. Pena, S. Alepuz, G. Asher, "Overview of Control Systems for the Operation of DFIGs in Wind Energy Applications", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 7, pp. 2776-2798, 2013.
- [15] A. D. Hansen, P. Sorensen, F. Blaabjerg, J. Becho, "Dynamic modelling of wind farm grid interaction", *Wind Engineering*, vol. 26, no. 4, pp. 191-208, 2002.
- [16] I. Hamdi, *Modélisation et commande de la génératrice asynchrone à double alimentation – Application à l'énergie éolienne*, Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2013.
- [17] A. Nabae, I. Takahashi, H. Akagi, « A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-17, n° 5, pp. 518–523, 1981.
- [18] J. Rodríguez, J.-S. Lai, F. Z. Peng, « Multilevel Inverters : A Survey of Topologies, Controls, and Applications », *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, n° 4, pp. 724–738, 2002.
- [19] N. Khadraoua, *Étude et commande d'un système éolien à base d'une machine asynchrone à double alimentation par la technique d'intelligence artificielle*, Thèse de Doctorat, Université Ain Témouchent – Belhadj Bouchaïb, Faculté des Sciences et de la Technologie, Département d'Électrotechnique, 2025–2026.

Annexe A

Paramètres du système simulé

Cette annexe regroupe les paramètres de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), de la turbine et de l'onduleur utilisés dans les simulations réalisées sous MATLAB/Simulink (chapitres 3 et 4).

TABLEAU A.1 – Paramètres électriques et mécaniques de la MADA.

Paramètre	Symbole	Valeur
Tension statorique (par phase)	V_s	220 V
Fréquence du réseau	f	50 Hz
Pulsation du réseau	ω_s	314,16 rad/s
Nombre de paires de pôles	p	2
Puissance nominale	P_n	3 kW
Couple électromagnétique nominal	C_n	20 N·m
Résistance statorique	R_s	1,2 Ω
Résistance rotorique	R_r	1,8 Ω
Inductance statorique	L_s	0,1554 H
Inductance rotorique	L_r	0,1568 H
Inductance mutuelle	M	0,15 H
Coefficient de dispersion	σ	0,0766
Moment d'inertie	J	0,2 kg·m ²
Coefficient de frottement	f_r	0,001 N·m·s/rad

TABLEAU A.2 – Paramètres de l'onduleur NPC à trois niveaux et de la simulation.

Paramètre	Symbole	Valeur
Tension du bus continu	V_{dc}	600 V
Fréquence des porteuses	f_p	600 Hz
Indice de modulation de fréquence	m_f	12
Pas de calcul	T_e	10 ⁻³ s

Annexe B

Transformation de Park

La transformation de Park permet de passer d'un système triphasé (a, b, c) à un repère diphasé tournant (d, q) , ce qui simplifie considérablement la modélisation des machines à courant alternatif en rendant constants, en régime permanent, les coefficients des équations.

La transformation directe (forme conservant la puissance) s'écrit :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{B.1})$$

La transformation inverse (de Park vers le repère triphasé) est donnée par :

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} \quad (\text{B.2})$$

où θ désigne l'angle électrique entre l'axe d et l'axe magnétique de la phase a , et où x représente indifféremment une tension, un courant ou un flux.